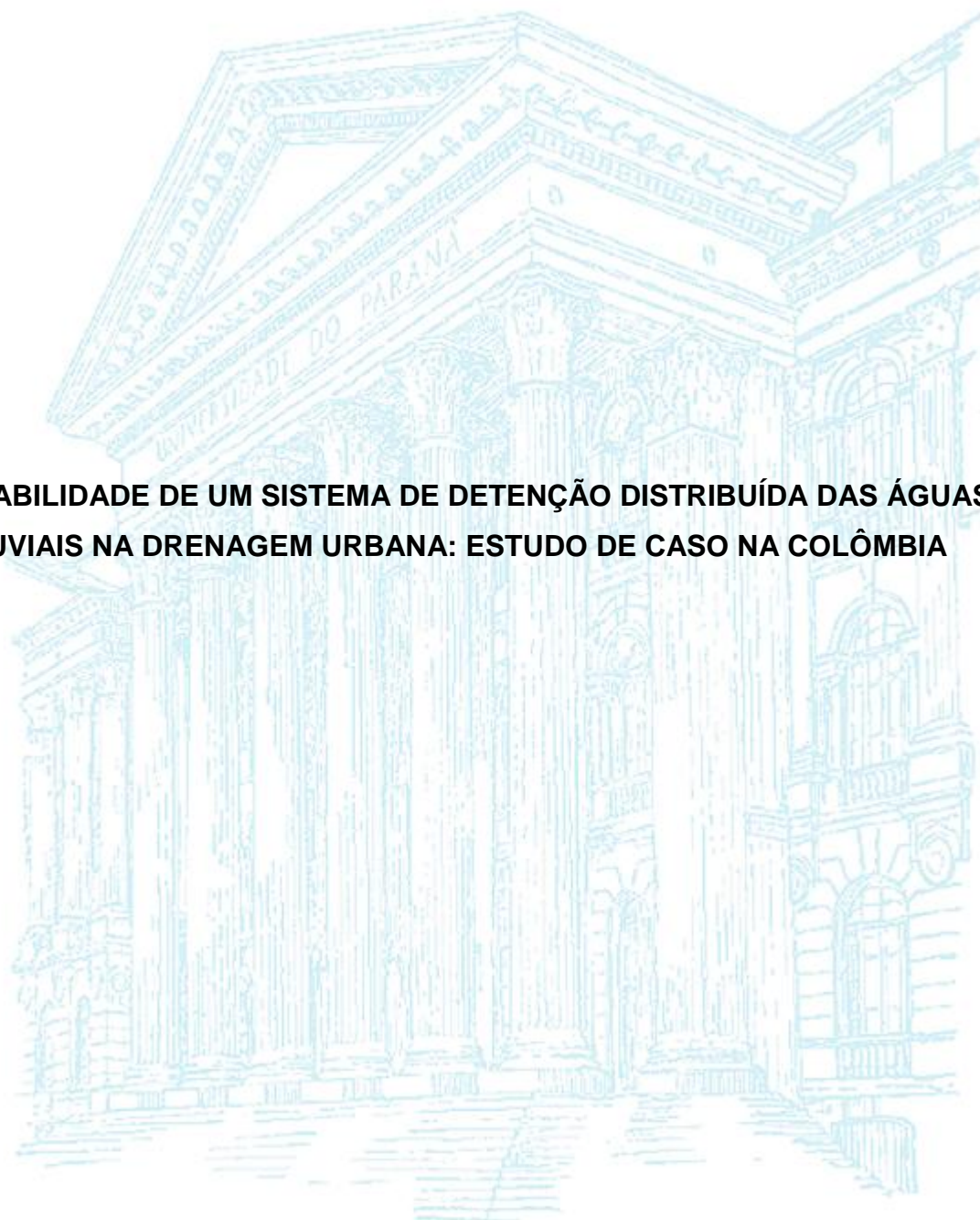


**SUKI ESTÍVALIZ BUSTAMANTE VILLABONA**

**APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE DETENÇÃO DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS  
PLUVIAIS NA DRENAGEM URBANA: ESTUDO DE CASO NA COLÔMBIA**



**CURITIBA**

**2013**

**SUKI ESTIVALIZ BUSTAMANTE VILLABONA**

**APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE DETENÇÃO DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS  
PLUVIAIS NA DRENAGEM URBANA: ESTUDO DE CASO NA COLÔMBIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Área de concentração em Engenharia de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Fendrich  
Co-Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

**CURITIBA**

**2013**

Bustamante Villabona, Suki Estivaliz

Aplicabilidade de um sistema de retenção distribuída das águas pluviais na drenagem urbana: estudo de caso na Colômbia / Suki Estivaliz Bustamante Villabona. – Curitiba, 2013.

110 f. : il.; graf., tab. + mapas

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Roberto Fendrich

Coorientador: José Junji Ota

1. Bacias hidrográficas - Urbanização. I. Fendrich, Roberto. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD 333.9162

TERMO DE APROVAÇÃO

**SUKI ESTÍVALIZ BUSTAMANTE VILLABONA**

**“APLICABILIDADE DE UM SISTEMA DE DETENÇÃO  
DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS PLUVIAIS NA DRENAGEM  
URBANA: ESTUDO DE CASO NA COLÔMBIA”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:



**Roberto Fendrich**

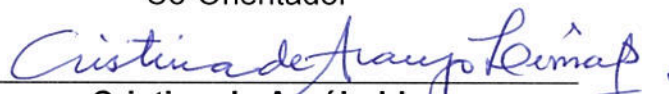
Universidade Federal do Paraná  
Orientador

MEMBROS:



**J. J. Ota**

Universidade Federal do Paraná  
Co-Orientador



**Cristina de Araújo Lima**

Universidade Federal do Paraná



**Miriam Rita Moro Mine**

Universidade Federal do Paraná



**Julio Gomes**

Universidade Federal do Paraná

**Curitiba, 28 de março de 2013**



## **DEDICATORIA**

**A meu pai, Jesús; a minha irmã Jude e a minha sobrinha Abril, pelo incentivo,  
amor e apoio incondicionais**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Roberto Fendrich e ao Prof. Dr. José Junji Ota, pela prontidão no encaminhamento e orientação em tudo, sempre que necessário.

Ao Governo Brasileiro, em especial a CAPES, pela ajuda financeira, através da bolsa de mestrado.

Aos professores Daniel Costa dos Santos e Miriam Rita Moro Mine, pelas valiosas sugestões e discussões construtivas que influenciaram diretamente na pesquisa.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná e seus docentes, pela dedicação e motivação incondicional que sempre transpareceram.

Ao CEHPAR, por ceder sua biblioteca às pesquisas necessárias e a Andreia L. Bueno, pela paciência e ajuda nas consultas.

Ao Engenheiro Jaime de Jesús Trujillo Delgado, de Empresas Públicas de Medellín (E.P.M), pela ajuda na obtenção dos dados para o projeto de pesquisa e as sugestões feitas sobre o projeto.

Ao Engenheiro Juan Camilo Martínez Gallo, da *Secretaria de Medio Ambiente* da *Alcaldía de Medellín*, pela disposição e gestão na busca dos dados para o projeto.

À Engenheira Laura Catalina Hernandez Posada, pela amizade, ajuda e interesse demonstrado pelo projeto e por mim.

Aos meus colegas do Programa, pelo companheirismo, principalmente nas horas mais difíceis.

A minha querida Família, Jesus, Jude e Abril, pelo amor, apoio e alegria passados a mim durante a realização dessa dissertação.

A Germán, pelo carinho, companheirismo, ajuda, paciência e especialmente por me mostrar as possibilidades de crescimento profissional e pessoal fora do meu País.

E finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa, um especial muito obrigado por tudo.

*“A boa sorte não é casual, é produto de trabalho”.*

Emily Dickinson.

## RESUMO

Nos centros urbanos em processo de expansão, os sistemas de drenagem vão se tornando insuficientes à medida que ocorre a ocupação do solo e, portanto a impermeabilização das bacias hidrográficas aumenta. O resultado do aumento da impermeabilização é o acréscimo nas vazões de pico e do volume escoado superficialmente, os quais propiciam transbordamentos e inundações em diversos pontos críticos das cidades. Deste modo, fica clara a importância de restabelecer as vazões de pré-desenvolvimento a partir de dispositivos que propiciem a retenção e infiltração das águas precipitadas antes de atingir a rede de drenagem. Assim sendo, o presente trabalho teve como principal objetivo estudar a aplicabilidade de técnica compensatória para atenuação das enchentes urbanas, através da coleta e retenção dos volumes de chuvas críticas, tendo por base a Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego “La Hueso”, localizado no Município de Medellín, Departamento (Estado) de Antioquia – Colômbia. A pesquisa baseou-se essencialmente na aplicação do método proposto por TUCCI (2000), que tem como principal ferramenta a Densidade Demográfica na área de estudo. Os resultados mostraram, em termos de tendência anual de impermeabilização dos solos da Bacia, que a área de estudo apresenta uma tendência de aumento na densidade demográfica e portanto, na impermeabilização dos solos. O dispositivo de retenção recomendado foi o reservatório de retenção distribuída de águas pluviais devido a que os solos da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso têm permeabilidades baixas, não permitindo a implementação de técnicas de infiltração. Com o valor calculado das áreas impermeáveis foi determinado o volume de retenção distribuído das águas pluviais na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, por unidade de área de coleta. A retenção distribuída das águas pluviais na Bacia pelos reservatórios de retenção, deve ser feita nos lotes de todos os quarteirões e nos espaços públicos, objetivando a diminuição dos níveis máximos das enchentes que ocorrem na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, em Medellín – Colômbia.

Palavras chave: urbanização de bacias hidrográficas; superfícies impermeáveis; enchentes urbanas; retenção distribuída de águas pluviais; Medellín.

## **ABSTRACT**

The expansion process of the urban center which results in increased urbanization in the watershed leads to inadequate drainage systems when land take occurs, resulting in increased urbanization watershed. The effect of the increasing in impervious surface is the enhancing of peak discharge and runoff volume, ending in overflows and floods in various critical points of a city. Therefore, it is clear the importance of reestablishing of discharges relating to the pre-development time with devices that allow detention and infiltration of rainwater before they reach the drainage network. Hence, this study aimed to investigate the applicability of the compensatory technique to attenuate urban flooding by collection and detention the volume of critical rainfall. This investigation is based on the urban watershed of "La Hueso" creek, located in the city of Medellín, Department (State) of Antioquia - Colombia. The research was mainly based on the application of the method proposed by TUCCI (2000), in which the main tool is the demographic density. In terms of watershed urbanization annual trend, the results showed a tendency to increase in demographic density and consequently in impervious surfaces. The device recommended is the reservoir of rainwater distributed detention, because the soils in the urban watershed of "La Hueso" creek have low permeability impeding the implementation of techniques for infiltration. With the calculated value of impervious areas was determined the rainwater distributed detention volume in the urban watershed of "La Hueso" creek by unit of collection area. The rainwater distributed detention by reservoirs should be made in all blocks and public spaces seeking to decrease the maximum levels of flooding occurring in the urban watershed of "La Hueso" creek in Medellin - Colombia.

**Keywords:** watershed urbanization; impervious surface; urban flooding; rainwater distributed detention; Medellín.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1	URBANIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	18
2.2	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO .....	37
2.3	CONTROLE DE ENCHENTES NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS .....	40
2.3.1	Medidas de controle para minimização de enchentes urbanas .....	42
2.3.2	Micro-reservatórios de retenção das águas pluviais para controle na fonte .....	46
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>66</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MUNICÍPIO DE MEDELLÍN .....	66
3.2	BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO .....	72
3.2.1	Localização .....	72
3.2.2	Características fisiográficas .....	73
3.2.3	Caracterização climática .....	74
3.2.4	Vegetação.....	75
3.2.5	Caracterização geológica .....	75
3.2.6	Urbanização.....	79
3.2.7	Uso do solo .....	79
3.2.8	Enchentes Urbanas .....	81
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>86</b>
4.1	GEODATABASE AMBIENTAL .....	86
4.2	ARCGIS .....	87
4.3	DADOS DA POPULAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO .....	87
4.4	MALHA FLUVIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO .....	88
4.5	RELAÇÃO IDF .....	88
4.6	METODO DE DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE DETENÇÃO DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS PLUVIAIS .....	90
4.6.1	Determinação das densidades demográficas na bacia hidrográfica do Córrego La Hueso.....	90



4.6.2	Evolução da impermeabilização dos solos na bacia hidrográfica do córrego La Hueso.....	90
4.6.3	Determinação do volume de retenção distribuída na bacia hidrográfica do córrego La Hueso .....	91
4.6.4	Tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso .....	92
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>93</b>
5.1	DENSIDADE DEMOGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO .....	93
5.2	EVOLUÇÃO DA IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO.....	96
5.3	VOLUME DE RETENÇÃO DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS PLUVIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO .....	98
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>102</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Hidrograma de Pré e Pós-desenvolvimento após chuva intensa em áreas urbanas .....	20
Figura 2.2– Os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos .....	21
Figura 2.3 - Variação do coeficiente de escoamento global com a urbanização.....	26
Figura 2.4 - Variação do coeficiente de escoamento superficial $C_r$ com a urbanização de bacias do Arroio Dilúvio em Porto Alegre RS .....	29
Figura 2.5 - Coeficiente de escoamento superficial em função da área impermeável da bacia.....	33
Figura 2.6 - Microreservatório de retenção das águas pluviais com $0,5 \text{ m}^3$ de capacidade .....	48
Figura 2.7- Seção Transversal do Reservatório Protótipo de PVC, Para Detenção das Águas Pluviais de Telhados ( $V = 0,34 \text{ m}^3$ ).....	49
Figura 2.8 - Redução nas Vazões do Hidrograma de um Loteamento Residencial com 12 ha, Para uma Chuva de Projeto de 15 min e $T_r = 2$ anos, na Inglaterra, com Todas as Casas Possuindo Reservatório de Detenção (Reservatório de Detenção: $V = 0,34 \text{ m}^3$ ; Orifício Extravasor $\varnothing = 1,0 \text{ cm}$ ) .....	53
Figura 2.9 - Instalação típica de um microreservatório de retenção em Sydney (adaptado de O'LAUGHLIN <i>et Al.</i> , 1995).....	55
Figura 2.10 - Aumento da vazão de pico em função da impermeabilização .....	56
Figura 2.11 - Aumento do volume escoado em função da impermeabilização .....	56
Figura 2.12 - Esquema construtivo dos reservatórios de retenção em lote.....	57
Figura 2.13 - Esquema construtivo dos reservatórios de retenção em lote.....	58
Figura 2.14–Detenção Distribuída das Águas Pluviais para Controle das Enchentes Urbanas na Cidade de Curitiba - PR.....	64
Figura 3.1 - Área Metropolitana del Valle de Aburrá .....	67
Figura 3.2 - Distribuição político-administrativa de Medellín .....	69
Figura 3.3 - Localização da Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego La Hueso no Município de Medellín ( $A = 23,63 \text{ km}^2$ ) .....	73
Figura 3.4 - Unidades litológicas na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.....	77
Figura 3.5 -Mapa de permeabilidade da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso	78

Figura 3.6 - Usos Gerais do Solo na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso .....	81
Figura 3.7–Córrego La Hueso. Mudança de canal trapezoidal para retangular na Carrera 73, na linha B do metrô.....	82
Figura 3.8 - Córrego La Hueso. Passarela de pedestres (Estação do metrô Suramericana) .....	83
Figura 3.9 - Córrego La Hueso. Vista da estação do metrô Suramericana, com destaque na Carrera 65.....	83
Figura 5.1 - Comunas correspondentes à Bacia do Córrego La Hueso .....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de escoamento superficial .....	20
Tabela 2.2 - Densidade populacional e área impermeável em bacias hidrográficas .....	24
Tabela 2.3 - Lâminas escoadas (mm) e coeficientes de escoamento globais (%) ..	25
Tabela 2.4 - Coeficientes de escoamento superficial nas sub-bacias do Arroio Dilúvio .....	28
Tabela 2.5 - Características de bacias hidrográficas urbanas brasileiras .....	32
Tabela 2.6 - Resultados comparativos dos coeficientes de escoamento superficial.....	33
Tabela 2.7–Fatores da equação do coeficiente de escoamento superficial .....	36
Tabela 2.8 - Resultados das simulações dos cenários .....	37
Tabela 2.9 – Efeitos da instalação de reservatórios de retenção das águas pluviais em loteamento residencial na Inglaterra .....	52
Tabela 2.10 - Reservatório lacrado com 1 m de profundidade.....	59
Tabela 2.11- Reservatório cilíndrico com 0,60 m de diâmetro .....	59
Tabela 2.12 - Custo de implantação dos reservatórios de 2,0 e 2,5 m <sup>3</sup> .....	60
Tabela 2.13 - Impactos da urbanização nas bacias hidrográficas.....	62
Tabela 2.14 - Volumes de retenção necessários em bacias hidrográficas urbanizadas de Porto Alegre- RS.....	62
Tabela 2.15 - Capacidade dos reservatórios de retenção distribuída das águas pluviais na bacia hidrográfica urbana do Rio Belém (A = 42 km <sup>2</sup> ). Curitiba – PR.....	63
Tabela 3.1 - Evolução da população do Município de Medellín .....	68
Tabela 3.2 - Projeção da população 2005-2030 do Município de Medellín.....	68
Tabela 3.3 - Características Físicas da Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego La Hueso .....	74
Tabela 3.4 - Coeficientes de Permeabilidade das unidades litológicas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso .....	79
Tabela 3.5 - Uso do Solo nas Comunas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso. ....	81
Tabela 3.6 - Eventos de inundação na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso ..	84

Tabela 4.1 - Relação IDF da Estação Hidrometeorológica San Cristobal.....	89
Tabela 5.1 - Áreas das comunas correspondentes à Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.....	94
Tabela 5.2 - Densidades demográficas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso (A=2363 ha).....	95
Tabela 5.3 - Evolução das áreas impermeáveis da Bacia Hidrográfica urbana do Córrego La Hueso pela metodologia da Densidade Demográfica .....	97
Tabela 5.4 -Capacidade dos reservatórios de retenção distribuída das águas pluviais da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso (A=23,63 km <sup>2</sup> ).101	

## LISTA DE SIGLAS

ArcGIS	<i>Software para Sistemas de Informações Geográficas</i>
ArcView	<i>Software para Sistemas de Informações Geográficas</i>
ArcEditor	<i>Software para Sistemas de Informações Geográficas</i>
ArcReader	<i>Software para Sistemas de Informações Geográficas</i>
ArcInfo	<i>Software para Sistemas de Informações Geográficas</i>
DAEE	<i>Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo</i>
DANE	<i>Departamento Administrativo Nacional de Estadística</i>
DNIT	<i>Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes</i>
DNP	<i>Departamento de Planeación Nacional</i>
EPM	<i>Empresas Públicas de Medellín</i>
ESRI	<i>Environmental System Research Institute</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
PNUD	<i>Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo</i>
POT	<i>Plan de Ordenamiento Territorial</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
SCS TR 55	<i>Soil Conservation Service - Technical Release 55</i>
SIMPAD	<i>Sistema Municipal de Prevención y Atención a Desastres</i>
UNAL	<i>Universidad Nacional de Colombia</i>
UNFPA	<i>Fondo de Población de las Naciones Unidas</i>



## 1 INTRODUÇÃO

Nos centros urbanos em processo de expansão, os sistemas de drenagem vão se tornando insuficientes à medida que ocorre a ocupação do solo e, portanto a impermeabilização das bacias hidrográficas aumenta. O resultado do aumento da impermeabilização é o acréscimo nas vazões de pico e do volume escoado superficialmente, tornando necessárias obras de ampliação do sistema de drenagem.

Como na maioria das cidades colombianas, os recursos para obras de infraestrutura, principalmente de drenagem urbana são escassos, essas obras tão importantes não são realizadas. Gera-se, então, uma sobrecarga dos condutos pluviais pelo aumento do fluxo nos picos de cheia, aumentando as vazões máximas, ocorrendo transbordamentos e inundações em diversos pontos críticos das cidades.

Atualmente, podem-se utilizar medidas de controle sustentáveis que buscam o controle do escoamento na fonte através da recuperação da capacidade de infiltração ou da detenção temporária do escoamento adicional gerado pelas superfícies impermeabilizadas urbanas. Na busca da população em se proteger contra as cheias urbanas, evitando o redimensionamento do sistema de drenagem, surgiu a idéia de se restabelecer as vazões de pré-desenvolvimento a partir de dispositivos que propiciavam a retenção e infiltração das águas precipitadas antes de atingir a rede de drenagem. A partir destes mecanismos visa-se o rearranjo no tempo e no espaço das vazões e, porventura, a diminuição dos volumes escoados, reduzindo a probabilidade de inundações e melhorando a qualidade de vida da população. Desta forma, esses mecanismos, denominados estruturas alternativas ou simplesmente técnicas compensatórias de drenagem, se apresentam como instrumentos de controle do escoamento superficial (Baptista *et Al.*, 2011).

Uma das técnicas compensatórias de caráter estrutural é a técnica para controle na fonte, que é uma técnica associada a pequenas superfícies de drenagem – incluídos aí os micro-reservatórios individuais, e telhados armazenadores.

Os micro-resevatórios domiciliares permitem utilizar as águas pluviais para usos domésticos não potáveis, respeitando concepção e critérios adequados de projeto para a dupla função de amortecimento de cheias e reserva de águas de abastecimento.

Na cidade de Medellín, localizada no Departamento de Antioquia – Colômbia, nas últimas três décadas têm sido apresentados fenômenos de chuvas torrenciais, com consequentes prejuízos econômicos e perdas humanas. As chuvas fortes provocam inundações que congestionam as vias e causam a queda de árvores. Além disso, há alguns córregos que são historicamente conhecidos por transbordar quando se apresentam os eventos críticos de chuva, e que são os responsáveis pelas inundações.

O trabalho analisou a aplicabilidade da técnica compensatória para atenuação das enchentes urbanas, por meio da coleta e retenção distribuída dos volumes de chuvas críticas, tendo por base a Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego “La Hueso”, com área de drenagem  $A = 23,63 \text{ km}^2$ , localizada no Município de Medellín, Departamento (Estado) de Antioquia – Colômbia.

Para atingir o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

1. Quantificar e tabular todas as áreas permeáveis e impermeáveis da Bacia Hidrográfica do Córrego “La Hueso”;
2. Calcular a taxa de impermeabilização dos solos da Bacia;
3. Obter e analisar os dados hidrológicos na zona de estudo;
4. Extrair dos dados a relação Intensidade x Duração x Frequência;
5. Calcular o volume de retenção distribuída das águas pluviais na Bacia Hidrográfica do Córrego “La Hueso”.

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos. No capítulo 2 se destacam alguns conceitos e métodos de análise de áreas impermeáveis em bacias hidrográficas, importantes para o desenvolvimento dessa pesquisa. No Capítulo 3, descreve-se a Área de Estudo, enquanto que, no Capítulo 4 explica-se de forma detalhada, complementada com a informação disponível na Revisão da Literatura, o processo de elaboração dessa pesquisa. No Capítulo 5, referente aos resultados obtidos são discutidos os dados e informações da pesquisa, e os cálculos efetuados que possibilitaram a determinação do volume de retenção distribuída das águas pluviais na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso e a

conseqüente formulação de conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

A urbanização na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, está intimamente ligada aos processos demográficos e da ocupação dos solos do Município de Medellín, que nos últimos anos tem experimentado um crescimento rápido da população e um aumento na alocação de usos da terra com ocupação de áreas exclusivamente residenciais que cobrem cerca de 70% do uso do solo urbano. Para avaliação do grau de urbanização da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, buscaram-se, no *Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE*, dados dos censos populacionais do Município de Medellín, para conhecimento do crescimento populacional entre o primeiro censo em 1905 até a previsão da população no ano de 2030.

Na avaliação da evolução das taxas de impermeabilização dos solos na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, entre os anos 1905 e 2030, foi utilizada a metodologia das densidades demográficas, proposta por TUCCI (2000), metodologia que relaciona a área impermeável com as densidades demográficas. Para a determinação das densidades demográficas na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso foi utilizada a área de cada *comuna* que corresponde à Bacia, e a informação da população na Bacia entre os anos 1905-2030.

A detenção das águas pluviais, distribuída em toda a extensão territorial da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, foi determinada por meio da equação que relaciona as vazões de pré e pós-desenvolvimento, que é uma expressão que depende do coeficiente de escoamento superficial, da intensidade da chuva e da área total da bacia hidrográfica. Partindo dessa premissa básica, estabeleceram-se várias correlações entre as principais variáveis hidrológicas na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, com 23,63 km<sup>2</sup> de área de drenagem, determinando-se o volume de detenção distribuída das águas pluviais na Bacia,  $V = 16 \frac{mm}{m^2}$ , e na seqüência, obtendo as capacidades correspondentes dos reservatórios de detenção distribuída para várias áreas de coleta das águas pluviais (Tabela 5.4).

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas, com base em literatura recente, informações sobre ações integradas ao controle das enchentes, através da análise da impermeabilização dos solos e a retenção das águas pluviais, visando a sua minimização.

### 2.1 URBANIZAÇÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

Desde a segunda metade do Século XX tem ocorrido um rápido desenvolvimento urbano em todo o mundo. De acordo com dados do Fundo de População das Nações Unidas – UNFPA (2011), esta é a primeira vez na história que a maioria da população mundial vive nas cidades. Atualmente, uma em cada 10 pessoas vive em uma cidade, e na América Latina 77% da população é urbana e essas taxas continuam a subir.

FARIA e PEDROSA (2005) afirmam que a ocupação descontrolada é uma das várias consequências do crescimento demográfico verificado nas últimas décadas. Este crescimento populacional gerou uma forte pressão urbanística, não acompanhada convenientemente pelas instituições e normas urbanísticas. A falta de planejamento em relação aos recursos pedológicos e hidrológicos tem vindo a acentuar o conflito existente entre o ambiente natural e o desenvolvimento físico-urbanístico.

Na Colômbia o processo de urbanização acelerada ocorreu após a década de 1950. Segundo SÁNCHEZ (2007), em 1938, a Colômbia tinha 8,7 milhões de habitantes, dos quais 31% estavam localizados em centros urbanos; em 1951 a população total atingiu 11,5 milhões, com 39% urbana; em 1964 o número subiu para 17,4 milhões de pessoas e a população urbana chegou a 52%.

De acordo com dados do censo do *Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE* (2005), em 1973 a população chegou a 22,8 milhões de habitantes, dos quais 59% viviam em centros urbanos; em 1985, a Colômbia chegou a 30 milhões, com 65% da população urbana. Em 1993, a população do País era de 37,6 milhões de pessoas, das quais 68% estavam nas cidades.

O último censo realizado na Colômbia foi em 2005, e segundo o DANE (2005), a população do País chegou a 41,5 milhões de habitantes, com 76% da população urbana.

SÁNCHEZ (2007) e UNFPA (2007) concordam que a ocupação urbana acelerada que ocorreu na Colômbia, em meados do Século XX, teve a ver em parte com o rápido crescimento da população, produto das altas taxas de fertilidade e o decréscimo das taxas de mortalidade nas áreas urbanas, mas principalmente por uma forte mobilidade da população das zonas rurais para as urbanas.

Com o aumento do processo de urbanização sem a correspondente implementação de infraestrutura, assiste-se ao desmatamento, ocupação de áreas inadequadas para a construção de infra-estruturas e à proliferação da atividade industrial em meio urbano, fatores que têm consequências graves ao nível da degradação do solo; durante o processo de urbanização convencional assiste-se à compactação do solo, que tem como consequência direta a diminuição da infiltração e aumento do escoamento superficial, que pode levar à ocorrência de inundações nas áreas a jusante.

Com a impermeabilização ocorre um grande aumento da vazão de pico do hidrograma e ocorre a antecipação no tempo desse valor de pico. Isto se deve a um aumento do coeficiente de escoamento superficial, causado pela impermeabilização do solo e pela redução do tempo de concentração, causado pelo aumento da velocidade de escoamento nas superfícies e pela canalização das águas pluviais (como mostrado na Figura 2.1).

De acordo com FENDRICH (2008), o coeficiente de escoamento superficial representa a parcela da chuva total que se transforma em escoamento superficial, podendo considerar ou não os efeitos de amortecimento na bacia. Em razão disto, o coeficiente de escoamento superficial é função de uma série de fatores, como o tipo de solo, a ocupação da bacia, a umidade antecedente, a intensidade da chuva, entre outros.

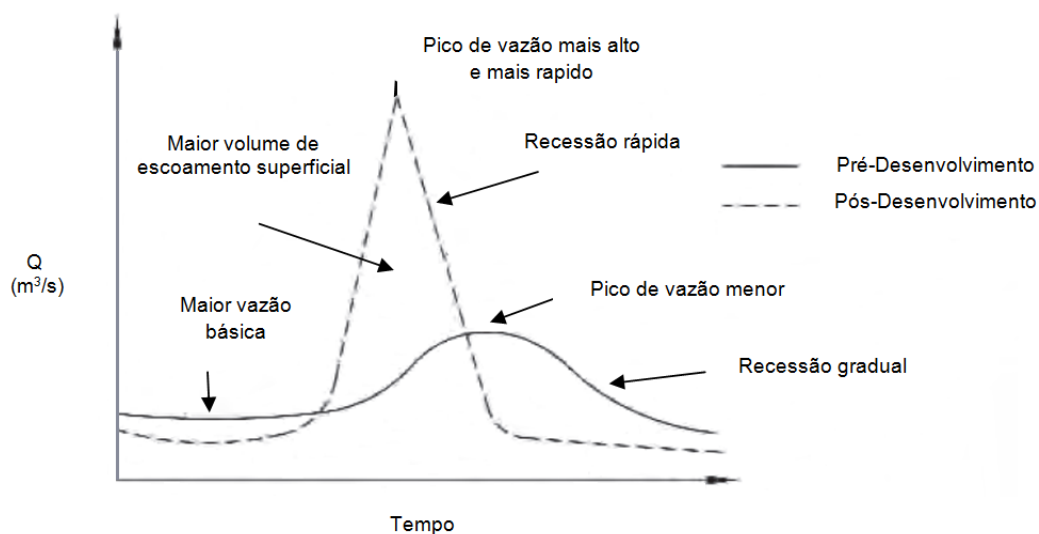


Figura 2.1 - Hidrograma de Pré e Pós-desenvolvimento após chuva intensa em áreas urbanas

Fonte: WOODS-BALLARD *et Al.* (2007)

FENDRICH (2008) fornece, para vários tipos de ocupação das áreas de drenagem, faixas de variação do coeficiente de escoamento superficial  $C$ .

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de escoamento superficial

Tipo de cobertura do Solo da Bacia	$C$
Superfícies de telhados	0,70 a 0,95
Pavimentos	0,40 a 0,90
Vias macadamizadas (saibro)	0,25 a 0,60
Vias e passeios apedregulhados	0,15 a 0,30
Superfícies não pavimentadas, quintais e lotes vazios	0,10 a 0,30
Matas e jardins gramados	0,05 a 0,25

Fonte: FENDRICH (2008)

Segundo SILVEIRA (1999), há um potencial de aumento de 6 a 7 vezes no escoamento superficial com a urbanização intensiva das áreas de drenagem dos rios e córregos. Além do aumento das vazões de pico, a impermeabilização faz com que aumente a frequência e a duração das vazões de pico, tendo como consequência impactos geomorfológicos sobre os cursos de água. Segundo TUCCI (2000), a impermeabilização de 7% da área dos lotes já acarreta na duplicação do escoamento superficial e que casos mais extremos, com a impermeabilização de 80% do lote, geram volumes de escoamento superficial de até oito vezes maior.



Com a urbanização, também se verificam alterações na rede de drenagem natural, que é substituída por estruturas artificiais, aumento de áreas impermeáveis e mudanças de microclima local. Tais alterações provocam maiores volumes de água pluvial escoando mais rapidamente, gerando um dos maiores problemas hidrológicos: O controle de enchentes críticas (Tucci *et Al.*, 2000). Coberturas, pavimentos e pisos impedem que a água seja absorvida pelo solo naturalmente, isso significa que infiltra menos água para recarga dos aquíferos, e por sua vez, faz com que mais água escoe pela superfície, com maior velocidade, causando enchentes e contaminando as reservas de água devido ao arraste de óleo, lixo e sedimentos, conforme apresentado na Figura 2.2.

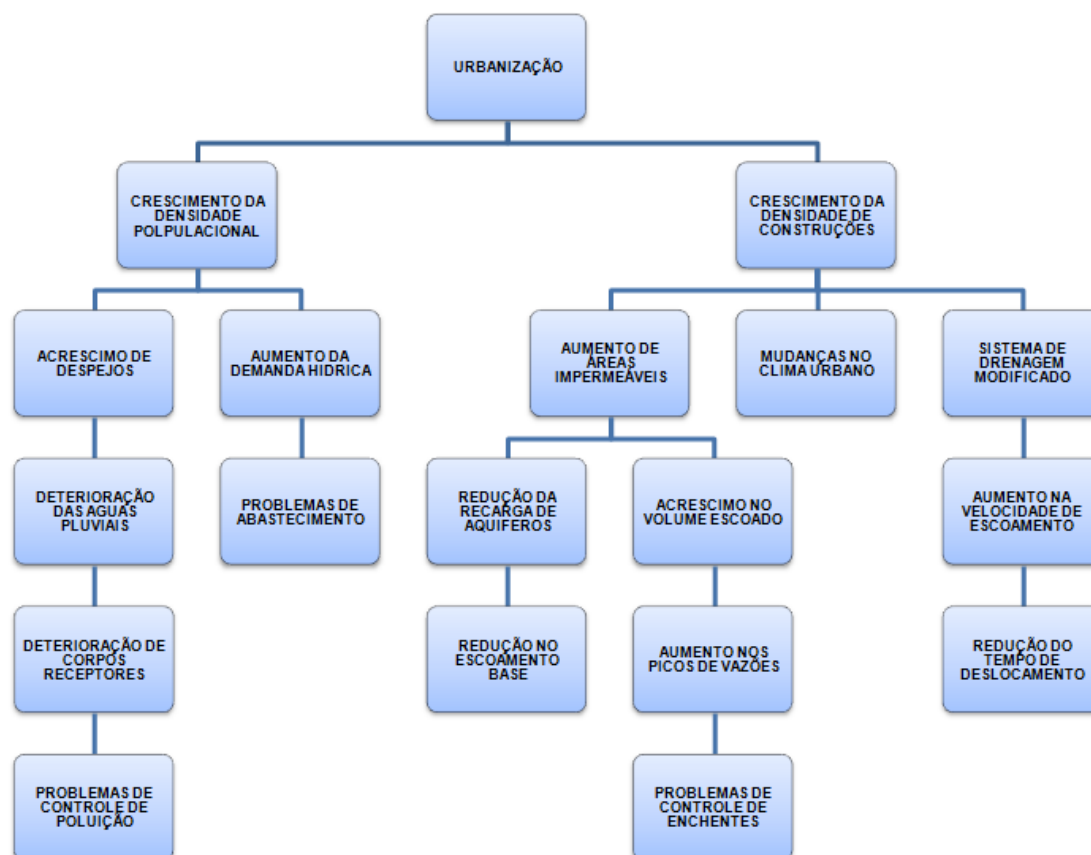


Figura 2.2– Os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos  
Fonte: TUCCI (2000)

O processo de urbanização implica um uso não sustentável dos sistemas naturais e cria numerosos problemas, tanto dentro como fora da cidade. Efeitos hidrológicos pelo aumento de área superficial impermeável, normalmente,

resultam em maiores temperaturas nas áreas urbanas do que nas áreas não urbanas, gerando ilhas de calor urbano (Silva, 2006).

Os sistemas de drenagem clássicos recomendam o rápido escoamento das águas pluviais das áreas urbanas, por meio da utilização de condutos, preferencialmente subterrâneos, funcionando por gravidade. A adoção destes procedimentos facilita ainda a circulação viária e o desenvolvimento urbano, sem a presença da água à superfície das ruas, ao mesmo tempo em que efetua a prevenção de doenças de veiculação hídrica.

Os sistemas clássicos são constituídos, basicamente, de dispositivos de microdrenagem, que efetuam o transporte das águas superficiais nas ruas (sarjetas), sua captação quando a capacidade de vazão é superada (bocas de lobo), e de condutos, usualmente enterrados, destinados ao transporte dessas águas até o deságue no lançamento final no vale receptor ou até sistemas de macrodrenagem, constituídos de canais abertos ou de condutos enterrados de porte significativo (galerias celulares). Em alguns casos são implantadas, ainda, obras complementares, como bueiros, dissipadores de energia e estações elevatórias de águas pluviais (Silva, 2006).

A urbanização intensa observada ao longo da segunda metade do Século XX veio evidenciar os limites das soluções clássicas de drenagem urbana no tocante à sua real eficácia, conforme discutido por BATISTA *et Al.* (2011):

- a) Ao retirar das áreas urbanizadas as águas de drenagem pluvial o mais rapidamente possível, transferem-se para jusante os problemas de inundação. Nesse sentido, novas áreas urbanizadas têm tendência a provocar inundações mais freqüentes em áreas de urbanização mais antigas;
- b) Como resultado, novas obras de drenagem devem ser construídas a jusante, tais como aumento da seção transversal de canais naturais, substituição de condutos de maior diâmetro, etc. Essas obras são em geral, muito onerosas e seu custo deve ser suportado por toda a comunidade;
- c) A canalização de cursos de água gera na população uma falsa idéia de segurança com respeito a inundações, facilitando a ocupação de áreas ribeirinhas. Isso acontece, sobretudo, quando os municípios não

incluem no Plano de Ocupação de Solos, zoneamentos que contemplem uma análise de risco de inundação;

d) Normalmente as soluções clássicas não contemplam os problemas de qualidade de água. São comuns os problemas de inadequação do funcionamento do sistema de drenagem causados por deposição de sedimentos, que tem origem em processos erosivos intensificados pela urbanização e/ou por deficiências no sistema de limpeza urbana. Os outros problemas de qualidade das águas de drenagem pluvial não são geralmente percebidos porque as fortes cargas de poluentes geradas pelos esgotos sanitários lançados “in natura” nos cursos de água mascaram a real dimensão do problema;

e) Finalmente, as soluções clássicas conduzem, muitas vezes, a situações irreversíveis que limitam outros usos presentes ou futuros da água em meio urbano. Como por exemplo, poder-se-ia citar a construção de galerias, que impossibilita a inserção dos cursos de água na paisagem urbana e a prática de atividades esportivas e de lazer junto a este.

CAMPANA e TUCCI (1994) propuseram uma metodologia para determinação da área impermeável de macrobacias urbanas, com base na densidade populacional, informação amplamente usada no planejamento urbano para caracterizar ocupação presente e futura. CAMPANA e TUCCI (1994) *apud* TUCCI *et Al.* (1989), estabeleceram, com base em dados de 11 bacias urbanas na Região Metropolitana de São Paulo a Equação (2.1), com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,960$  e desvio padrão 3,6 %, entre área impermeável e parcelas da bacia com diferentes tipos de densidades demográficas:

$$I = 4D_1 + 4,57D_2 + 4,7D_3 - 405,7 \quad (2.1)$$

Onde:  $I$  = taxa de áreas impermeáveis (%);

$D_1$  = parcela da bacia com densidade demográfica < 50 hab/ha;

$D_2$  = parcela da bacia com densidade demográfica entre 50 hab/ha e 100 hab/ha;

$D_3$  = parcela da bacia com densidade demográfica superior a 100 hab/ha.

No mesmo estudo, os autores apresentam resultados obtidos para Porto Alegre, onde foi ajustada a Equação (2.2), com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,944$ :

$$I = 0,54D - 4,936 \quad (2.2)$$

Onde:  $I$  = taxa de áreas impermeáveis;

$D$  = densidade média da bacia (hab/ha).

Ainda, no mesmo estudo, os autores apresentam uma verificação do modelo, com base em conceitos de matemática fuzzy e classificação de imagens de satélites por máxima verossimilhança. Após a verificação de desempenho, foram estimadas as taxas de área impermeável para Porto Alegre e regiões metropolitanas de São Paulo e de Curitiba, onde os resultados foram sintetizados em uma Curva Média entre densidade populacional e área impermeável. Os resultados obtidos neste trabalho serviram para proposição de um método de estimativa de áreas impermeáveis, com base na densidade populacional, para a área de estudo em Medellín - Colômbia.

CAMPANA e TUCCI (1994) estabeleceram a relação entre área impermeável e densidade populacional, com base nos dados de Curitiba, Porto Alegre e São Paulo. Na Tabela 2.2 apresentam os valores da curva média ajustada.

Tabela 2.2 - Densidade populacional e área impermeável em bacias hidrográficas

<b>Densidade Populacional (hab/ha)</b>	<b>Área Impermeável (%)</b>
25	11,3
50	23,3
75	36,0
100	50,0
120	58,7
150	64,7
200	66,7

Fonte: CAMPANA e TUCCI (1994)

SILVEIRA (1999) apresentou uma quantificação do impacto da urbanização sobre coeficientes de escoamento em Porto Alegre - RS; os dados básicos foram do acervo coletado pela instrumentação da bacia do Arroio Dilúvio em fins da década de 1970 e início dos anos 1980, no âmbito do denominado Projeto do Arroio Dilúvio.

De acordo com SILVEIRA (1999), definindo-se o coeficiente de escoamento global de uma bacia como a razão entre a lâmina precipitada anual e a lâmina de água equivalente ao volume escoado anual na bacia (escoamento de base mais escoamento superficial), com os dados da bacia do Arroio Dilúvio, o Autor chegou aos valores da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Lâminas escoadas (mm) e coeficientes de escoamento globais (%)

Posto	1978	1979	1980	1981	$C$ (%)	AURB (%)	AIMP (%)
Ipiranga (CPRM)		590	645		49	36	9,8
Agronomia	205	257	270	128	18	15	1,9
Saint-Hilaire			232	384	25	7	0,4
Bela Vista		757	817	560	57	89	50,4
Cascata II		612	680		51	52	16,4

$C$  = coeficiente de escoamento global médio

AURB = porcentagem urbanizada da bacia (1982) conforme Silveira (1996)

AIMP = porcentagem impermeabilizada da bacia a partir das informações de Alvarez e Sanchez (1979)

Os valores apresentados de 1978 a 1981 referem-se a anos completos sem problemas de consistência ou de preenchimento de falhas.

Os coeficientes  $C$  resultantes representam uma amostra precária, é certo, pois há somente cinco valores, mas sua evolução com as taxas de urbanização e de impermeabilização revelam uma tendência coerente com o efeito esperado da urbanização nos escoamentos, conforme ilustra a Figura 2.3.

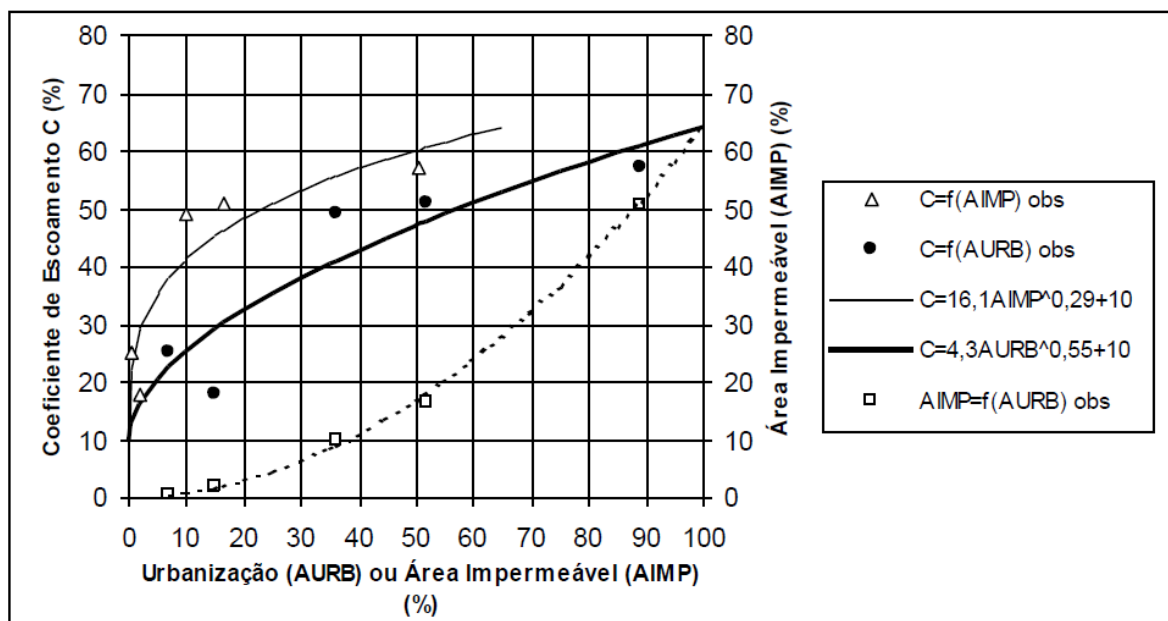


Figura 2.3 - Variação do coeficiente de escoamento global com a urbanização  
Fonte: SILVEIRA (1999)

Apesar da falta de significância estatística, devido ao número reduzido de pontos, foram ajustadas algumas funções expressando o coeficiente global de escoamento  $C$  em função da taxa de urbanização AURB e da taxa de impermeabilização AIMP. Pode-se observar que se optou por curvas para sintetizar o comportamento não linear sugerido pelos pontos amostrais. Esta não linearidade revelou que o coeficiente de escoamento evoluiu rapidamente até uma taxa de impermeabilização de 20% (equivalente a uma urbanização de 50%), com  $C$  atingindo um valor entre 45 e 50%. A partir deste estágio, se a urbanização avançar sobre toda a bacia,  $C$  encaminha-se mais lentamente para um valor de pouco mais de 60%. Isto significa que o potencial de aumento de escoamento com a urbanização foi de 6 a 7 vezes, mas já atingia 4 a 5 vezes com uma urbanização de 50% (admitindo-se um  $C$  mínimo de 10%, representando uma condição natural).

Note-se que se pode avaliar a evolução de  $C$  indiferentemente com a taxa de urbanização, ou com a taxa de impermeabilização, porque a relação entre elas segue uma tendência consistente (também não linear), conforme evidenciado na Figura 2.3.



SILVEIRA (1999) analisando exclusivamente as parcelas do escoamento superficial de eventos isolados de cheia, em quatro sub-bacias do Arroio Dilúvio, em Porto Alegre - RS, afirma que é possível avaliar o impacto da urbanização em outro tipo de coeficiente de escoamento, o coeficiente de escoamento superficial, com a Equação (2.3):

$$P_n = \frac{C_r(P_b - P_i)}{100} \quad (2.3)$$

Onde:  $C_r$  = coeficiente de escoamento superficial (%);

$P_n$  = chuva efetiva dos eventos (mm);

$P_b$  = chuva bruta dos eventos (mm);

$P_i$  = lâmina equivalente ao volume de perdas por retenção nas superfícies impermeáveis (mm).

O ajuste da Equação (2.3) aos eventos de chuva permitiu avaliar o quanto  $C_r$  se aproxima da taxa de áreas impermeáveis (AIMP). As hipóteses são de que numa bacia hidrográfica urbanizada:

- a)  $C_r \approx \text{AIMP}$ ;
- b) Que as superfícies permeáveis não geram escoamento superficial;
- c)  $P_i$  reflete, efetivamente, somente as perdas nas superfícies impermeáveis.

A medida que  $C_r$  excede significativamente AIMP ou  $P_i$  toma valores elevados torna-se evidente a contribuição das áreas suburbanas e das áreas permeáveis da mancha urbana nos escoamentos superficiais.

A Tabela 2.4 mostra os resultados dos ajustes da Equação (2.3) aos eventos de chuva de quatro sub-bacias do Arroio Dilúvio.

Tabela 2.4 - Coeficientes de escoamento superficial nas sub-bacias do Arroio Dilúvio

Sub-bacia	A (km <sup>2</sup> )	AIMP (%)	AURB (%)	n	$C_r$ (%)	$P_i$ (mm)	R <sup>2</sup>
São Vicente	2,6	50,4	89	20	58	1,39	0,971
Cascata	7,6	16,4	52	14	15	4,04	0,935
Ipiranga- Agronomia	57	19,7	62	67	38	2,95	0,944
Beco Carvalho	3,4	15,6	38	15	16	2,67	0,902

n = número de eventos

Fonte: SILVEIRA (1999)

Da Tabela 2.4 os ajustes revelam uma tendência de  $C_r$  seguir AIMP em termos médios. Também se podem verificar coeficientes de variação entre 16% e 58% para  $C_r$ , o que não permite negar que há contribuição de superfícies permeáveis em muitos eventos de cheias nessas bacias.

Com quatro pares ( $C_r$ , AURB), da Tabela 2.4, mais dois pontos extremos ( $C_r = 0$ ; AURB=0) e ( $C_r = 64\%$ ; AURB =100%), o autor ajustou uma curva e avaliou sua aderência à curva AIMP em função de AURB, apresentada na Figura 2.3. O resultado é apresentado na Figura 2.4. A exemplo dos ajustes anteriores, SILVEIRA (1999) ressalta que a curva obtida de  $C_r$  em função das taxas de urbanização (AURB) não tem significância estatística (é uma curva empírica), mas apresenta um comportamento aceitável fisicamente.

No comparativo das curvas de  $C_r$  e  $C$  (note-se que o Autor repetiu na Figura 2.4 a curva de  $C$  da Figura 2.3), ficou respeitada a lógica de que o coeficiente de escoamento global  $C$  deve superar o coeficiente de escoamento superficial de eventos isolados  $C_r$ , pois o primeiro incorpora o escoamento básico. Além disso, à medida que a urbanização aumenta as curvas reproduzem o fenômeno esperado que  $C_r$  se aproxima de  $C$ , justamente porque a parcela relativa do escoamento básico diminui.

Na Figura 2.4, SILVEIRA (1999) reproduziu também a curva de AIMP função de AURB da Figura 2.3, para fazer um cotejo com a curva de  $C_r$ . Mesmo considerando-se todas as incertezas envolvendo o ajuste de ambas as curvas, não se pode deixar de notar que há um deslocamento vertical perceptível para cima da curva de  $C_r$  em relação à de AIMP. O interessante é que o Autor dá uma explicação plausível dessa diferença, que permitiria manter a hipótese de que  $C_r \approx \text{AIMP}$ . Basta lembrar de que os pontos que deram origem à curva AIMP função de AURB correspondem a valores de impermeabilização de por volta do

ano de 1970 e as taxas de urbanização são do ano de 1982. É de se esperar, portanto, que os valores de impermeabilização estejam subestimados frente aos da urbanização.

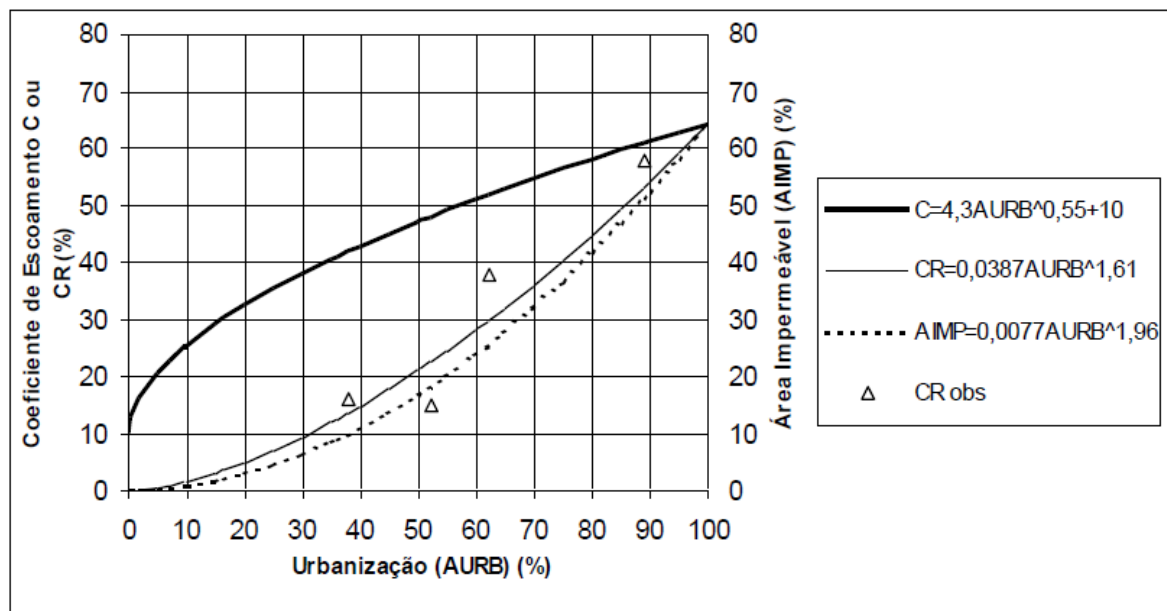


Figura 2.4 - Variação do coeficiente de escoamento superficial  $C_r$  com a urbanização de bacias do Arroio Dilúvio em Porto Alegre RS

Fonte: SILVEIRA (1999)

A evolução dos coeficientes de escoamento global e de escoamento superficial é obtida pelas Equações (2.4) e (2.5), as quais estão representadas graficamente na Figura 2.4.

$$C = 4,3 AURB^{0,55} + 10 \quad (2.4)$$

Onde:  $C$  = coeficiente de escoamento global da bacia (parcela da chuva anual que se torna escoamento) (%);

$AURB$  = taxa de urbanização da bacia (%).

$$C_r = 0,0387 AURB^{1,61} \quad (2.5)$$

Onde:  $C_r$  = coeficiente de escoamento superficial da bacia (parcela da chuva isolada que se torna escoamento superficial) (%);

$AURB$  = taxa de urbanização da bacia (%).

SILVEIRA (1999) concluiu que ambas as equações, embora sem validação estatística, reproduzem o comportamento físico esperado do impacto da urbanização, ou seja, o crescimento dos dois coeficientes com a urbanização, mas com  $C_r < C$ , havendo uma convergência nas altas taxas de urbanização. A diferença entre os coeficientes de escoamento é interpretada como a contribuição do escoamento básico, que diminui com o aumento da taxa de urbanização da bacia. Conclui ainda que,  $C_r = C = 64\%$  para uma urbanização total da bacia hidrográfica, conforme indicado na Figura 2.4.

TUCCI (2000) define coeficiente de escoamento superficial,  $C$ , como a relação entre o volume total do escoamento superficial no evento e o volume total precipitado, permitindo analisar o impacto das áreas impermeáveis no gerenciamento do espaço urbano das bacias hidrográficas, com taxas de urbanização em crescimento. No estudo, o Autor apresenta a variação da vazão máxima de pequenas bacias hidrográficas urbanas, com base na expressão do Método Racional e na variação do seu coeficiente de escoamento superficial.

Numa bacia hidrográfica urbana existem dois tipos de superfícies: Permeável e impermeável, e desse modo:

$$C = \frac{C_p A_p + C_i A_i}{A_t} \quad (2.6)$$

Onde:  $C$  = coeficiente de escoamento superficial;

$C_p$  = coeficiente de escoamento superficial da área permeável;

$A_p$  = área permeável da bacia;

$C_i$  = coeficiente de escoamento superficial da área impermeável;

$A_i$  = área impermeável da bacia;

$A_t$  = área total da bacia.

A Equação (2.6) pode ter seu desenvolvimento algébrico obtendo a Equação (2.7) e a Equação (2.8):

$$C = C_p \frac{A_p}{A_t} + C_i \frac{A_i}{A_t} = C_p \left(1 - \frac{A_i}{A_t}\right) + C_i \frac{A_i}{A_t} \quad (2.7)$$

$$C = C_p + C_i \frac{A_i}{A_t} - C_p \frac{A_i}{A_t} = C_p + (C_i - C_p) AI \quad (2.8)$$

Onde:  $AI = A_i/A_t$  = parcela de áreas impermeáveis da bacia hidrográfica;

$A_t = A_p + A_i$  = área total da bacia.

TUCCI (2000) cita que SCHUELER (1987) obteve, com base em 44 bacias hidrográficas urbanas pequenas nos E.U.A., a relação dada pela Equação (2.9):

$$C = 0,05 + 0,9 AI \quad R^2 = 0,71 \quad (2.9)$$

Onde:  $C_i - C_p = 0,90$ ;  $C_i = 0,95$ ;  $C_p = 0,05$ .

No Brasil não existia uma amostra do tamanho da usada por Schueler, mas uma amostra disponível de 12 bacias urbanas é apresentada por TUCI (2000) na Tabela 2.5. Os dados foram selecionados considerando-se: Bacias com pelo menos cinco eventos; valores consistentes de áreas impermeáveis; valores consistentes quanto aos eventos hidrológicos.

Com base nas áreas impermeáveis das 12 bacias hidrográficas urbanas brasileiras, TUCI (2000) obteve o coeficiente de escoamento superficial, C, pela relação (2.10):

$$C = 0,04 + 0,80 AI \quad (R^2=0,81) \quad (2.10)$$

Onde:  $AI$  = parcela de áreas impermeáveis da bacia (%).

A Equação (2.10) está representada na Figura 2.5.

Tabela 2.5 - Características de bacias hidrográficas urbanas brasileiras

Bacia	Cidade	Área da bacia (km <sup>2</sup> )	AI (%)	C	Fonte	Número de eventos
Bela Vista	Porto Alegre	2,6	50,4	0,58	1	20
Dilúvio/Ipiranga (a)	Porto Alegre	25,5	19,7	0,16	2	27
Dilúvio/Ipiranga (b)	Porto Alegre	25,5	40	0,37	2	12
Beco do Carvalho	Porto Alegre	3,4	15,6	0,16	1	15
Cascata	Porto Alegre	7,6	16,4	0,15	1	14
Casa de Portugal	Porto Alegre	6,7	1	0,09	3	7
Agronomia	Porto Alegre	17,1	4	0,11	3	5
Jaguarão	Joinville	6,5	8	0,137	3	6
Mathias	Joinville	1,86	16	0,23	3	8
Belém/Prado Velho	Curitiba	42	40	0,42	4	10
Meninos	São Paulo	106,7	40	0,37	2	5
Gregório	S. Carlos	15,6	29	0,12	3	5

**Nota:** 1 Silveira (1999); 2 Santos *et Al.* (1999); 3 Diaz e Tucci (1987) e 4 Germano (1998).

(a) condições urbanas de 1979/1982; (b) condições urbanas de 1996/1997.

Fonte: TUCCI (2000)

Pode-se observar na Tabela 2.5, que as bacias hidrográficas urbanas Casa de Portugal, Agronomia e Jaguarão, apresentavam valores muito baixos de áreas impermeáveis, mostrando mais tendência para bacias hidrográficas rurais, e não como afirmam os autores, bacias hidrográficas urbanas.

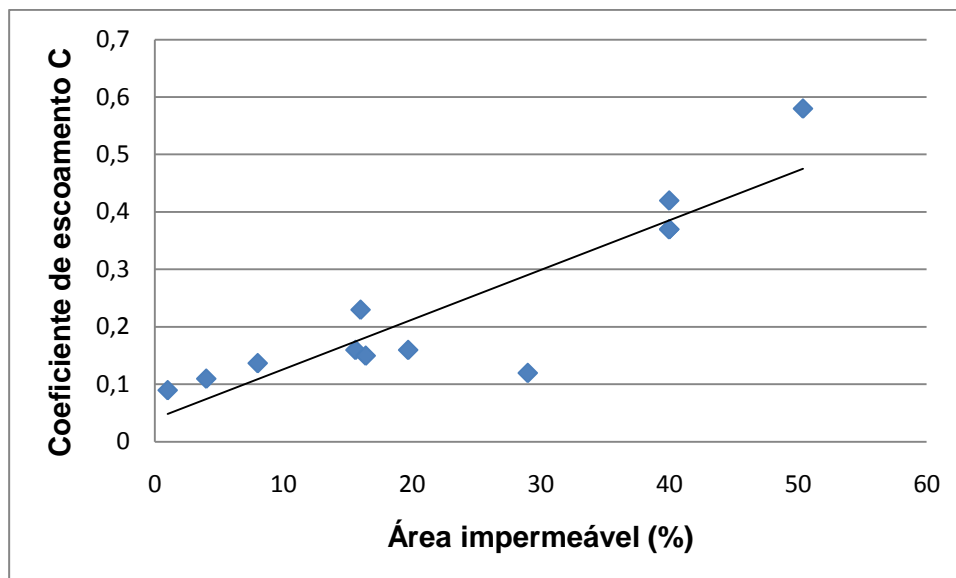


Figura 2.5 - Coeficiente de escoamento superficial em função da área impermeável da bacia

Fonte: TUCCI (2000)

Na Figura 2.5, a bacia hidrográfica do Ribeirão do Gregório tende a reduzir o coeficiente de escoamento superficial. Retirando esta bacia, resulta a Equação (2.11):

$$C = 0,047 + 0,90 AI \quad (R^2=0,92) \quad (2.11)$$

A Equação (2.11) é praticamente igual à Equação (2.9), obtida por SCHUELER (1987) para 44 bacias urbanas pequenas nos E.U.A.

Na Tabela 2.6, TUCCI (2000) apresenta os valores comparativos de  $C_p$  e  $C_i$  obtidos para as bacias hidrográficas urbanas brasileiras em relação às bacias urbanas dos E.U.A.

Tabela 2.6 - Resultados comparativos dos coeficientes de escoamento superficial

Alternativa	$C_p$	$C_i$	$R^2$
Brasil (12 postos)	0,04	0,84	0,81
Brasil (11 postos)	0,047	0,947	0,92
E.U.A (44 postos)	0,05	0,95	0,71

Fonte: TUCCI (2000)

Considerando que  $C_i$  representa o coeficiente de escoamento superficial de parcelas urbanizadas, o valor 0,95 retrata, principalmente, superfícies de asfalto e concreto onde o valor é próximo ao limite superior. Adicionalmente, deve-se considerar que o coeficiente de escoamento superficial,  $C$ , não é um valor fixo, mas sim variável com a magnitude das enchentes, condições hidrológicas antecedentes da bacia, características da distribuição da chuva, tipo de solo, entre outros. Numa bacia rural, o valor do coeficiente de escoamento superficial não é sempre o correspondente a  $C_p$ , mas varia de acordo com os condicionantes físicos da bacia, e as equações indicadas permitem uma estimativa média do valor do coeficiente de escoamento superficial.

TUCCI (2000) relaciona o coeficiente de escoamento superficial,  $C$ , com a densidade demográfica,  $DH$ , utilizando uma função desenvolvida com o ajuste dos dados das cidades de Porto Alegre, São Paulo e Curitiba.

A relação, válida para  $DH < 120$  hab/ha, é dada pela Equação (2.12):

$$AI = 0,00489 DH \quad (R^2 = 0,997) \quad (2.12)$$

Onde:  $DH$  = densidade demográfica (hab/ha);

$AI$  = parcela de área impermeável da área total da bacia (entre 0 e 1).

A Equação (2.12) deve ser utilizada somente para bacias hidrográficas acima de 200ha de área e com ocupação predominantemente residencial.

Substituindo a Equação (2.12) nas Equações (2.10) e (2.11), resulta nas Equações (2.13) e (2.14):

$$C = 0,0768 + 0,0041 DH \quad (2.13)$$

$$C = 0,0783 + 0,0035 DH \quad (2.14)$$

Onde:  $C$  e  $DH$  = definidos anteriormente.



Com as Equações (2.13) e (2.14) é possível estabelecer o aumento do coeficiente de escoamento superficial,  $C$ , de uma bacia hidrográfica, com base na sua parcela de área impermeável ou na sua densidade demográfica.

Para esclarecer esse aumento, é preciso retomar a Expressão (2.8), que permite analisar, de forma geral, o impacto das áreas impermeáveis no coeficiente de escoamento. A Equação (2.8) pode ter seu desenvolvimento algébrico obtendo a Equação (2.15):

$$\frac{C}{C_p} = 1 + \frac{(C_i - C_p)}{C_p} AI \quad (2.15)$$

$$\text{Fazendo: } m = \frac{(C_i - C_p)}{C_p}$$

Obtém-se a Expressão (2.16):

$$\frac{C}{C_p} = 1 + mAI \quad (2.16)$$

A Equação (2.12) mostra a parcela de área impermeável em função da densidade demográfica  $DH$ , e substituindo na Equação (2.16), obtém-se a Expressão (2.17):

$$\frac{C}{C_p} = 1 + rDH \quad (2.17)$$

$$\text{Onde: } r = \frac{(C_i - C_p)}{C_p} \times 0,00489$$

Assim, se chega à Expressão (2.18), que matematicamente mostra um aumento do coeficiente de escoamento em relação às áreas impermeáveis, devido que as expressões  $mAI$  e  $rDH$  são sempre maiores do que zero.

$$\frac{C}{C_p} = 1 + mAI = 1 + rDH \quad (2.18)$$

Onde:  $C_p$  = coeficiente de escoamento superficial para condições rurais da bacia.

Os valores de  $m$  e  $r$  obtidos pelo uso das relações anteriores são determinados pela Equação (2.19); substituindo os valores de  $C_i$  e  $C_p$  para 12 bacias hidrográficas urbanas brasileiras, tem-se:

$$m = \frac{(C_i - C_p)}{C_p} = \frac{(0,84 - 0,04)}{0,04} = 20 \quad (2.19)$$

Da Equação (2.18), se tem:  $1 + mAI = 1 + rDH$

Então:  $20 \times (0,00489DH) = rDH$

Portanto:  $r = 0,0978$

Igual análise é feita para calcular  $m$  e  $r$  para a Equação (2.14). Os valores de  $m$  e  $r$  estão indicados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7–Fatores da equação do coeficiente de escoamento superficial

<b>Tipo</b>	<b><math>m</math></b>	<b><math>r</math></b>
Equação (2.13)	20	0,0978
Equação (2.14)	19,1	0,0936

Fonte: TUCCI (2000)

Destas duas equações o Autor coloca que para cada aumento de 10% da área impermeável, ocorrem aumentos de 191 a 200% no coeficiente de escoamento superficial. Da mesma forma, para cada 10 hab/ha de aumento na densidade demográfica, ocorre de 93,6 a 97,8% de aumento no coeficiente de escoamento superficial.

JUSTINO *et Al.* (2011) analisaram o efeito do aumento da impermeabilização dos solos urbanos no crescimento do escoamento superficial, através de hidrogramas, proposto pelo método SCS TR-55 (*Soil Conservation Service - Technical Release 55*). Para simular os avanços da urbanização foi escolhida a bacia do Córrego Lagoinha, localizada na cidade de Uberlândia, pertencente ao Estado de Minas Gerais, sobre a qual foram construídos e analisados quatro cenários de ocupação distintos: pré-urbanização, atual, futuro I e futuro II, sendo o cenário de pré-urbanização considerado como o de referência.

Os cenários futuros foram elaborados de acordo à ocupação prevista para a região a partir da Lei Municipal Complementar Nº 245, de 30 de novembro de 2000, que dispõe sobre o Parcelamento e Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo do Município de Uberlândia. A Tabela 2.8 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

Tabela 2.8 - Resultados das simulações dos cenários

<b>Cenários</b>	<b>Vazão de Pico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>% Acréscimo</b>
Pré-urbanização	176,960	-
Atual	232,000	31,10
Futuro I	273,690	54,66
Futuro II	282,080	59,40

Fonte: JUSTINO *et Al.* (2011)

As simulações mostraram que para uma variação de 29 a 54% no índice de áreas impermeáveis, a vazão de pico pode sofrer um aumento de até 59,40% sobre a vazão de pico do cenário de referência. Diante desses acréscimos, a parte canalizada do córrego se mostrou insuficiente para escoar as novas vazões provenientes da ocupação da área nos cenários atual e futuros, mostrando a necessidade de se utilizar medidas alternativas para o controle das cheias.

## 2.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO

De acordo com o DNIT (2005), o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é o tempo que leva a gota que precipita no ponto mais distante da bacia, para atingir a seção em estudo, contado a partir do início da chuva, quando toda a área de drenagem da bacia está contribuindo para a vazão máxima. Na medida em que os padrões de uso e ocupação do solo promovem a impermeabilização da área de drenagem, a parcela da água que antes infiltrava e a que ficava retida na vegetação, passa a escoar pelos condutos de drenagem pluvial, aumentando o escoamento superficial e reduzindo o tempo de concentração da bacia hidrográfica.

A avaliação do tempo de concentração de uma bacia é bastante complexa, devido aos inúmeros condicionantes envolvidos, existindo uma grande variedade de expressões de cálculo, merecendo, por isso, grande atenção na sua determinação. Existem numerosas fórmulas empíricas para calcular o tempo de concentração em função do comprimento (L) do curso principal, do desnível total (H) desde as cabeceiras, eventualmente da área de drenagem (A), ou de outros parâmetros escolhidos.

As seguintes fórmulas para tempo de concentração de bacias hidrográficas são específicas para bacias rurais, especialmente porque na equação não aparece um termo que as relacione à urbanização, como por exemplo, a impermeabilidade dos solos da bacia ou a densidade demográfica.

**Ven Te Chow:** Expressão desenvolvida baseada nos dados de 20 bacias rurais com áreas entre 1 km<sup>2</sup> e 19 km<sup>2</sup> (DAEE, 1978).

$$t_c = 52,64 \times \left( \frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,64} \quad (2.20)$$

Onde:  $t_c$ =tempo de concentração, em min;

L=comprimento do maior curso de água, em km;

I=Declividade média do talvegue, em m/km.

**Kirpich:** Expressão desenvolvida a partir de informação de sete bacias rurais em Tennessee – EUA, com áreas entre 0,50 e 45,3 ha, canais bem definidos e declives situados entre 3% e 10%%. (Chow et Al, 1994).

$$t_c = 3,989 \times \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (2.21)$$

Onde:  $t_c$ =tempo de concentração, em min;

L=comprimento do maior curso de água, em km;

S=Declividade média do talvegue, em m/m.

**Corps of Engineers:** Expressão desenvolvida para bacias rurais com áreas até de 12.000 km<sup>2</sup> (MOPU, 1987):

$$t_c = 0,191 \times \frac{L^{0,76}}{S^{0,19}} \quad (2.22)$$

Onde:  $t_c$ =tempo de concentração, em h;

$L$  =comprimento do curso d'água principal, em km;

$S$ = Declividade média, em m/m.

As fórmulas para tempo de concentração de bacias hidrográficas urbanas consideram as condições de urbanização na bacia, especialmente a impermeabilização dos solos.

**Schaake:** Expressão baseada em dados de 19 bacias urbanizadas americanas muito pequenas, de áreas inferiores a 63 hectares. (Silveira, 2005).

$$t_c = 0,0828 \times \frac{L^{0,24}}{S^{0,16} \times A_{imp}^{0,26}} \quad (2.23)$$

Onde:  $t_c$ =tempo de concentração, em h;

$L$  =comprimento do canal principal, em km;

$A_{imp}$ = fração de área impermeável (varia entre 0 e 1);

$S$ = Declividade média, em m/m.

**Desbordes:** Expressão baseada em dados de algumas bacias de Schaake e de bacias francesas, numa amostra de 21 bacias até 51 km<sup>2</sup>. (Silveira, 2005)

$$t_c = 0,0869 \times \frac{A^{0,3039}}{S^{0,3832} \times A_{imp}^{0,4523}} \quad (2.24)$$

Onde:  $t_c$ =tempo de concentração, em h;

$A$  = área da bacia, em km<sup>2</sup>;

$A_{imp}$  = fração de área impermeável (varia entre 0 e 1);

$S$  = Declividade média, em m/m.

**Carter:** Expressão que se destaca por representar bacias de baixa declividade do talvegue (menor que 0,5%). (Silveira, 2005)

$$t_c = 0,0977 \times \frac{L^{0,6}}{S^{0,3}} \quad (2.25)$$

Onde:  $t_c$  = tempo de concentração, em h;

L = comprimento do canal principal, em km;

S = Declividade média, em m/m.

Na avaliação do tempo de concentração de pré-desenvolvimento da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, utilizar-se as equações (2.20), de Ven Te Chow, e de pós – desenvolvimento da Bacia, a Equação (2.23) devida a Schaake.

### 2.3 CONTROLE DE ENCHENTES NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS

A drenagem urbana realizada de forma clássica tem procurado remover da forma mais eficiente possível a água dos centros urbanos. Sob esta concepção projetam-se grandes sistemas de galerias pluviais e ações destinadas à “melhoria do fluxo” em rios e canais, concretizadas através de cortes de meandros, retificações e mudanças de declividade de fundo. As limitações das soluções clássicas são ressaltadas pelos prejuízos e dificuldades que as grandes cidades enfrentam para resolver o problema das cheias urbanas.

A partir da Década de 1970, outra abordagem para tratar desses problemas vem sendo desenvolvida. Trata-se do conceito de “tecnologias alternativas” ou “compensatórias” de drenagem, que buscam neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e a preservação ambiental (Baptista *et Al*, 2011).

Essas tecnologias são alternativas em relação às soluções clássicas porque consideram os impactos da urbanização de forma global, tomando a bacia hidrográfica como base de estudo, buscando compensar, sistematicamente, os efeitos da urbanização. Esta compensação é efetuada

pelo controle da produção de excedentes de água decorrentes da impermeabilização e evitando-se a sua transferência rápida para jusante.

Tais resultados podem ser obtidos por meio de combinações de soluções tecnológicas que facilitam a infiltração de águas pluviais e o aumento do tempo de trânsito, com seu armazenamento temporário.

Segundo BAPTISTA *et Al.* (2011), as soluções mais adotadas são as seguintes:

1. Bacias ou reservatórios de retenção, também conhecidas como bacias de amortecimento de cheias, que podem ser utilizadas em diferentes escalas, desde pequenas parcelas até grandes áreas;
2. Estruturas para armazenamento temporário, implantadas por simples adequação de configuração topográfica em áreas de estacionamento, terrenos esportivos e áreas livres em geral;
3. Pavimentos porosos, destinados ao armazenamento temporário e/ou infiltração, em áreas de estacionamento e no sistema viário;
4. Estruturas que favorecem a infiltração e a percolação, tais como trincheiras, poços, valas, valetas, etc.;
5. Canalizações de cursos de água com técnicas que favorecem o escoamento lento ou mesmo a retenção temporária de águas;
6. Tratamentos de fundos de vale, com zoneamento de planícies de inundação e delimitação de áreas *non aedificandi* destinadas ao armazenamento temporário.

Pelo enfoque dos Autores na compensação dos efeitos da urbanização, essas soluções apresentam inúmeras vantagens com relação ao enfoque tradicional. Tais vantagens dependem, naturalmente, das soluções adotadas e da sua inserção no ambiente urbano. As técnicas que facilitam a infiltração de águas pluviais, por exemplo, além de contribuírem para a redução dos volumes de escoamento superficial ainda desempenham um papel na compensação das perdas na recarga das reservas de água subterrânea decorrentes dos processos de impermeabilização ligados ao desenvolvimento urbano.

### 2.3.1 Medidas de controle para minimização de enchentes urbanas

O conjunto de medidas para o controle do impacto da urbanização, que visam a correção e/ou prevenção, minimizando os danos das inundações, pode ser classificado, de acordo com sua natureza, em medidas estruturais ou não-estruturais.

Medidas de controle não-estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes, pela introdução de normas, regulamentos e programas. As medidas não estruturais podem ser agrupadas em (Tucci, 2006): Zoneamento de áreas de inundação através de regulamentação do uso da terra, construções a prova de enchentes, seguro de enchentes, previsão e alerta de inundação. As medidas não-estruturais não são concebidas para dar proteção completa. A combinação dessas medidas com as medidas estruturais pode minimizar significativamente os prejuízos com um custo menor.

Segundo TUCCI (2006), medidas de controle estruturais são medidas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes. Essas medidas podem ser extensivas ou intensivas. As medidas extensivas são aquelas que agem na bacia procurando modificar as relações entre precipitação e vazão, como o aumento da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. As medidas intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser de três tipos: a) Aceleram o escoamento: Construção de diques, aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros; b) Retardam o escoamento: Reservatórios e as bacias de amortecimento; c) Desvios do escoamento são obras como canais de desvios.

De acordo com TUCCI (2006), as medidas de controle do escoamento podem ser classificadas, de acordo com sua ação na bacia hidrográfica, em:

1. Distribuída ou na fonte: É o tipo de controle que atua sobre o lote, praças e passeios;
2. Na microdrenagem: É o controle que age sobre o hidrograma resultante de um ou mais loteamentos;
3. Na macrodrenagem: É o controle sobre os principais riachos urbanos.



Ainda segundo o Autor, as medidas de controle também podem ser organizadas, de acordo com a sua ação sobre o hidrograma em cada uma das partes das bacias mencionadas acima, em:

- a) Infiltração e percolação: Normalmente, cria espaço para que a água tenha maior infiltração e percolação no solo, utilizando o armazenamento e o fluxo subterrâneo para retardar o escoamento superficial;
- b) Armazenamento: Através de reservatórios, que podem ser de tamanho adequado para uso numa residência ( $1-3 \text{ m}^3$ ) até terem porte para a macrodrenagem urbana (alguns milhares de  $\text{m}^3$ ). O efeito do reservatório urbano é o de deter parte do volume do escoamento superficial, reduzindo o seu pico e distribuindo a vazão no tempo;
- c) Aumento da eficiência do escoamento: Através de condutos e canais, drenando áreas inundadas. Esse tipo de solução tende a transferir enchentes de uma área para outra, mas pode ser benéfico quando utilizado em conjunto com reservatórios de detenção;
- d) Diques e estações de bombeamento: Solução tradicional de controle localizado de enchentes em áreas urbanas que não possuam espaço para amortecimento da inundação.

A seguir são apresentados os principais aspectos do controle distrib ido das águas pluviais localizado no lote (controle na fonte), por tratar-se do objeto deste estudo.

#### 2.3.1.1 Medidas de controle distrib ido das águas pluviais

As principais medidas de controle localizado no lote, estacionamentos, parques e passeios são denominadas, normalmente, de controle na fonte. As principais medidas são as seguintes:

- a) O aumento de áreas de infiltra o e percol o;
- b) O armazenamento temporário em reservatórios residenciais ou telhados.

As principais características do controle local do escoamento são as seguintes (Tucci, 2006):

- a) Aumento da eficiência do sistema de drenagem de jusante dos locais controlados;
- b) Aumento da capacidade de controle de enchentes dos sistemas;
- c) Dificuldade de controlar, projetar e fazer manutenção de um grande número de sistemas;
- d) Os custos de operação e manutenção podem ser altos.

De acordo com AGRA (2001), as medidas de controle com infiltração e percolação das águas pluviais, são estruturas que objetivam devolver à bacia a capacidade de infiltração e percolação perdidas pela impermeabilização. Estas estruturas possuem a grande vantagem de promover a recarga do aquífero, que fica impossibilitada pela urbanização. Porém, a recarga dos aquíferos pode se tornar uma desvantagem, pois, dependendo do estado do escoamento, esta característica pode se tornar uma fonte de contaminação para as águas subterrâneas.

As estruturas de infiltração podem ser projetadas de forma a serem “invisíveis” no arranjo urbanístico, estando descobertas ou cobertas com grama ou com um revestimento permeável. Isso permite uma boa integração com o espaço urbano, as quais poderão ser implantadas em praças, parques, ao longo de calçadas ou ruas.

As principais estruturas de controle com infiltração são as trincheiras de infiltração, as valas e planos de infiltração, os pavimentos permeáveis, e as bacias de infiltração.

A trincheira de infiltração é um dispositivo implantado junto à superfície ou a pequena profundidade, com a finalidade de recolher as águas pluviais de afluência perpendicular a seu comprimento, favorecendo a infiltração e/ou armazenamento temporário. As trincheiras são preenchidas com material granular graúdo, geralmente pedra de mão, seixos ou brita. As trincheiras de infiltração devem ser revestidas com manta geotêxtil com o objetivo de evitar a passagem de finos e a consequente colmatção da estrutura (Woods-Ballard *et Al.*, 2007).

As valas de infiltração são dispositivos de drenagem lateral, muitas vezes utilizados paralelos às ruas, estradas, estacionamentos e conjuntos habitacionais, entre outros. Essas valas concentram o fluxo das áreas adjacentes e criam condições para uma infiltração ao longo do seu comprimento. Após uma precipitação intensa, o nível sobe e, como a infiltração é mais lenta, mantém-se com água durante algum tempo. Portanto, o seu volume deve ser o suficiente para não ocorrer alagamento. Esse dispositivo funciona, na realidade, como um reservatório de detenção, à medida que a drenagem que escoar para a vala é superior à capacidade de infiltração. Nos períodos com pouca precipitação ou de estiagem, ele é mantido seco. Esse dispositivo permite, também, a redução da quantidade de poluição transportada a jusante (Baptista *et Al.*, 2011).

Os pavimentos permeáveis são dispositivos de infiltração que permitem que a água da chuva se infiltre através da superfície e para as camadas subjacentes, onde a água é armazenada temporariamente antes da infiltração para o solo. Este dispositivo pode ser implantado nos Sistema viário e áreas de estacionamento (Woods-Ballard *et Al.*, 2007).

As bacias de infiltração são reservatórios de paredes e fundo permeáveis, que armazenam temporariamente os excessos das águas pluviais, infiltrando os volumes escoados de acordo com a capacidade do solo. Este tipo de estrutura pode estar integrada a depressões naturais do terreno, ou ainda projetada para integrar-se ao jardim de uma residência. O funcionamento adequado só é garantido se houver manutenção, evitando que haja colmatção do fundo pela deposição de material fino (Woods-Ballard *et Al.*, 2007).

BAPTISTA *et Al.*, (2011) definiram as estruturas de armazenamento na fonte das águas pluviais como dispositivos implantados junto a parcelas ou pequenos conjuntos de parcelas, associadas, portanto, a pequenas superfícies de drenagem, buscando restituir o armazenamento natural perdido após a urbanização. São aqui incluídas as valas e valetas de armazenamento, os micro-reservatórios individuais e telhados armazenadores.

Os micro-reservatórios são estruturas simples, em forma de caixas semelhantes às utilizadas para abastecimento. Podem ser executadas em diversos tipos de material, por exemplo: concreto, alvenaria, PVC, ou outro material. Possuem uma estrutura de descarga como orifício. Normalmente são

enterrados, porém, se houver limitação de altura por conta da rede de drenagem podem ser aparentes e integrados ao paisagismo.

O telhado armazenador é um dispositivo alternativo que visa compensar o efeito da impermeabilização, utilizando para isso a própria estrutura impactante, ou seja, o telhado que impermeabiliza a área. Segundo BATISTA *et Al.* (2011), a técnica compensatória consiste no armazenamento provisoriamente a água das chuvas e a restituição de uma vazão amortecida à rede de água pluvial ou a um outro exutório. A técnica dos telhados armazenadores é bastante atrativa por não requerer espaço fundiário suplementar e por oferecer um bom potencial de reintegração aos projetos arquitetônicos e urbanísticos. Esta integração pode ser pouco perceptível, como nos telhados armazenadores planos, ou participar da paisagem urbana, no caso de telhados vegetalizados.

### 2.3.2 Micro-reservatórios de detenção das águas pluviais para controle na fonte

De acordo com TASSI (2002), atualmente o uso de reservatórios de detenção é uma das alternativas consideradas para o controle de cheias urbanas. Esses dispositivos de armazenamento de águas pluviais permitem o retardo do tempo de concentração, atenuando o pico dos hidrogramas de saída, possibilitando a recuperação da capacidade de amortecimento perdida pela bacia devido à impermeabilização.

Os reservatórios de detenção podem trazer segundo O'LOUGHLIN *et Al.* (1995), TUCCI (2006) e BAPTISTA *et Al.* (2011), os seguintes benefícios, dependendo dos propósitos de uso e da forma como foram projetados:

- a) Prevenir impactos adversos do desenvolvimento pela restauração do armazenamento natural perdido;
- b) Diminuir problemas de inundações localizadas;
- c) Reduzir as vazões máximas de inundação a jusante;
- d) Reduzir os custos dos sistemas de drenagem a jusante, através da redução das dimensões do sistema de drenagem;
- e) Controlar problemas de erosão em pequenos tributários através da redução das vazões;
- f) Aumentar o tempo de resposta do escoamento superficial;
- g) Melhorar e criar base para controle da qualidade da água;
- h) Incentivar o reuso e a recarga de aquíferos.

O'LOUGHLIN *et Al.* (1995) enumeraram também as desvantagens dos sistemas de retenção locais:

- a) Os regulamentos são muitas vezes injustos, e os critérios e métodos de design são geralmente demasiado simplistas;
- b) Sob algumas condições hidrológicas, armazenamentos localizados na parte superior da bacia podem aumentar as taxas de escoamento a jusante, devido a hidrogramas sobrepostos;
- c) A manutenção é o problema principal, restando uma grande carga de administração ao poder público e obrigações muito pesadas para os proprietários;
- d) São pouco eficientes na redução de poluentes agregados;
- e) O sistema pode não ser economicamente eficiente, se comparados com soluções mais centralizadas.

Os micro-reservatórios de retenção vêm sendo propostos por vários autores ao longo do tempo e para vários países do mundo: TSUCHIYA (1978) no Japão, SCHILLING (1982) na Alemanha e BALMFORTH e BAILEY (1985) na Inglaterra, citados por FENDRICH (2002); O'LOUGHLIN *et Al.* (1995) em Sydney na Austrália, PILAR e BIAIN (2000) na Argentina, CRUZ *et Al.* (2000), TUCCI (2000), e TASSI (2002), no Brasil.

TSUCHIYA (1978) citado por FENDRICH (2002) descreve que no Japão os micro-reservatórios de retenção já são obrigatórios, uma vez que naquele País os problemas de cheias decorrentes da urbanização eram cada vez mais frequentes. Cerca de 62% desses reservatórios são residenciais, e ocupam cerca de 1 ou 2% da superfície controlada.

SCHILLING (1982) também citado por FENDRICH (2002) fez um estudo na Cidade de Hildesheim, Alemanha, onde analisou o comportamento de micro-reservatórios conectados com o tubo de queda do telhado. O reservatório tem um volume de  $0,5\text{m}^3$ , com estrutura de descarga de 2cm de diâmetro, e ainda um extravasor no topo, conforme indicado na Figura 2.6. Foi simulada uma área de 2,69ha com 0,78ha de telhado, ou seja, 29% de área impermeabilizada por telhados. Com a colocação distribuída na área de 140 micro-reservatórios de retenção, conseguiu-se uma redução máxima na vazão de pico de 42%.

FENDRICH (2002) relata que BALMFORTH e BAILEY (1985) desenvolveram um estudo piloto na Universidade Politécnica de Sheffield–Inglaterra, para pesquisar a viabilidade do emprego do armazenamento das águas pluviais coletadas de telhados, em pequenos reservatórios de retenção domiciliares, conectados ao telhado da casa por um condutor vertical, visando à redução das vazões máximas do escoamento superficial. No estudo foi utilizado um reservatório protótipo de PVC, com dimensões de (116,8 x 58,4 x 58,4) cm, com profundidade efetiva de 50 cm e volume útil de 340 l, indicado na Figura 2.7.

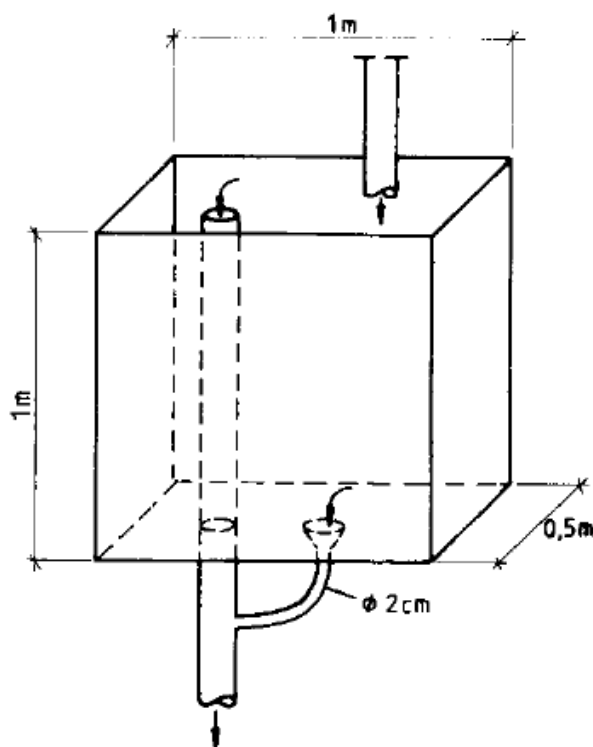


Figura 2.6 - Microreservatório de retenção das águas pluviais com  $0,5\text{ m}^3$  de capacidade

Fonte: FENDRICH (2002) *apud* SCHILLING (1982)

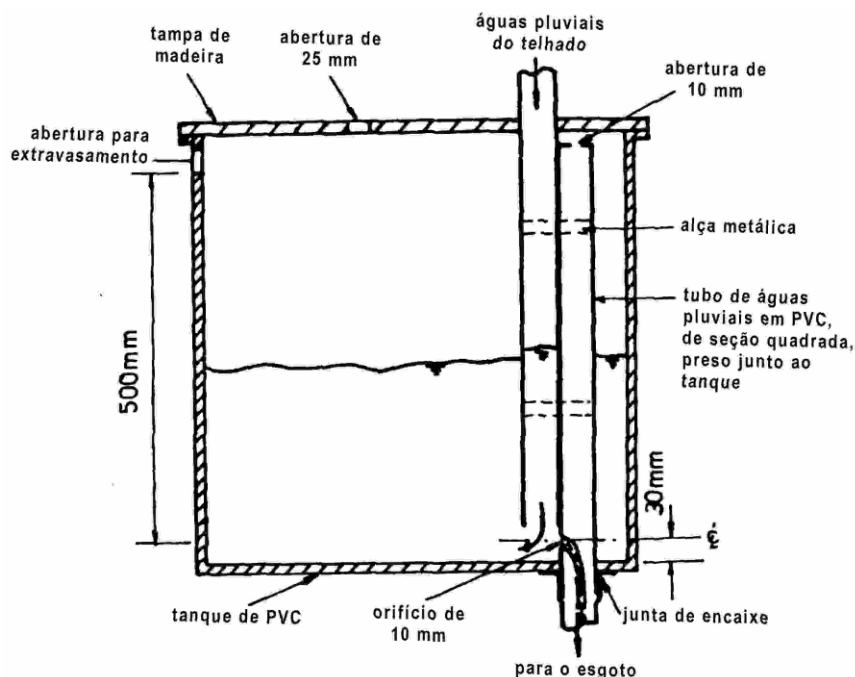


Figura 2.7- Seção Transversal do Reservatório Protótipo de PVC, Para Detenção das Águas Pluviais de Telhados ( $V = 0,34 \text{ m}^3$ )  
 Fonte: FENDRICH ( 2002) *apud* BALMFORTH e BAILEY (1985)

Para um telhado padrão com  $50\text{m}^2$  de área foram simuladas chuvas máximas com durações de 15, 30 e 60 min, para tempo de recorrência  $T_r = 2$  anos, e coeficiente de escoamento superficial  $C = 1,0$ . Um orifício com 1,0 cm de diâmetro foi utilizado para restringir a vazão máxima de saída do reservatório em 0,17 l/s, para o volume de armazenamento correspondente a chuva máxima de 15 min. As chuvas de 30 e 60 min de duração causaram pequenas extravasões, as quais foram consideradas aceitáveis.

No início do escoamento das águas pluviais no condutor vertical, estas passam diretamente sobre a face do orifício extravasor, a fim de remover qualquer entulho que tenha se acumulado na seção transversal deste, durante o esvaziamento do reservatório devido à chuva anterior.

FENDRICH (2002) relata que realizaram duas séries de testes no reservatório protótipo de detenção, Figura 2.7, para condições de escoamento permanente, obtendo:

$$Q = 1,1108 \times 10^{-5} \times h^{0,452} \quad (2.26)$$

Onde:  $Q$  = vazão através do orifício extravasor ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$h$  = carga hidráulica acima da linha de centro do orifício (mm).

O volume de água armazenado no reservatório, para várias cargas hidráulicas:

$$h = 2.058,18 V^{1,01} \quad (2.27)$$

Onde:  $V$  = volume armazenado no reservatório ( $\text{m}^3$ ).

Relacionando as Equações (2.26) e (2.27) obtém-se o volume de armazenamento no reservatório protótipo:

$$V = 3,663 \times 10^7 Q^{2,19} \quad (2.28)$$

Onde:  $V$ ;  $Q$  = definidos anteriormente.

De acordo com FENDRICH (2002), o objetivo dos experimentos em campo, com o reservatório protótipo de retenção das águas pluviais, foi o estabelecimento das propriedades de auto-limpeza do orifício extravasor, a fim de avaliar os efeitos do vandalismo e do congelamento da água. O reservatório de retenção foi instalado sob um condutor vertical, drenando um telhado com  $50 \text{ m}^2$  de área, sobre uma pequena e moderna casa estudantil.

A partir da instalação, em Outubro de 1983, o reservatório de retenção ficou sob monitoramento por um período de nove meses. Durante esse período, não ocorreu nenhum bloqueio do orifício extravasor, apesar de terem caído muitas folhas das árvores e, nenhum efeito adverso com congelamento da água (qualquer água congelada no fundo do tanque não obstrui a entrada do orifício extravasor). O reservatório de retenção era inspecionado duas vezes por dia e, durante todo o período de monitoramento, não ocorreram extravasamentos nem problemas com vandalismo.



FENDRICH (2002) relata que BALMFORTH e BAILEY, (1985), para avaliarem o potencial de instalação de reservatórios de retenção das águas pluviais, simularam seus efeitos numa área piloto, utilizando uma versão modificada do Método do Hidrograma do Instituto de Hidrologia Wallingford. Para avaliar os efeitos dos reservatórios de retenção das águas pluviais dos telhados, foi gerado um hidrograma padrão por meio de dez simulações, utilizando a propagação do escoamento não-linear em reservatórios.

Consideraram que um reservatório de armazenamento seria suficiente para drenar toda a área do telhado padrão com  $50\text{m}^2$ . Transformando as unidades da Equação (2.28), em mm/h para o escoamento e  $\text{mm}/50\text{m}^2$  para o armazenamento, obtiveram a Expressão (2.29):

$$V = 0,017 Q^{2,19} \quad (2.29)$$

Onde:  $V$  = volume de armazenamento do reservatório de retenção das águas pluviais ( $\text{mm}/50\text{m}^2$ );  
 $Q$  = vazão gerada pelo telhado padrão (mm/h).

Para avaliarem os efeitos da instalação dos reservatórios de retenção das águas pluviais, obtiveram dados de um loteamento tipicamente residencial, constituído por casas semi-separadas, principalmente, e de poucas casas separadas entre si. A área contribuinte total do loteamento de 12ha (19% de áreas impermeáveis e 13% a inclinação dos telhados) era drenada por um sistema separador, composto de 46 trechos de galerias de águas pluviais, tendo um tempo de concentração de 7,8 min.

A Tabela 2.9 mostra os valores da vazão máxima e do volume escoado superficialmente, na saída da bacia hidrográfica, obtidos para uma chuva de projeto com tempo de recorrência  $T_r = 2$  anos, para três condições: a.) Sem a instalação dos reservatórios de retenção; b.) Todos os condutores verticais das águas pluviais conectados a reservatórios de retenção; c.) Todos os condutores verticais das águas pluviais desconectados do sistema.

Tabela 2.9 – Efeitos da instalação de reservatórios de retenção das águas pluviais em loteamento residencial na Inglaterra

Condição	Duração da Chuva (+)	Vazão Máxima	Volume Escoado (*)
	(min)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> )
Sem reservatórios de retenção	15	0,497	210
	30	0,442	272
	60	0,332	340
Reservatórios de retenção em todas as casas do loteamento	15	0,314	209
	30	0,288	259
	60	0,226	267
Todos os condutores verticais das águas pluviais desconectados	15	0,231	101
	30	0,207	130
	60	0,157	162

(+) Tempo de recorrência  $T_r = 2$  anos

(\*) Volume escoado na 1ª hora no emissário do loteamento

Fonte: FENDRICH (2002) *apud* BALMFORTH e BAILEY (1985)

Pode-se observar na Tabela 2.9 que para reservatórios de retenção das águas pluviais, instalados em todas as casas do loteamento, a redução ocorrida no pico das vazões foram, respectivamente, iguais a 37%, 35% e 32%, para as durações da chuva correspondentes a 15 min, 30 min e 60 min. Na Figura 2.8 é mostrado o efeito da redução nas vazões do hidrograma resultante da chuva de 15 min de duração e  $T_r = 2$  anos, promovido pela instalação dos reservatórios de retenção das águas pluviais em todas as casas do loteamento residencial.

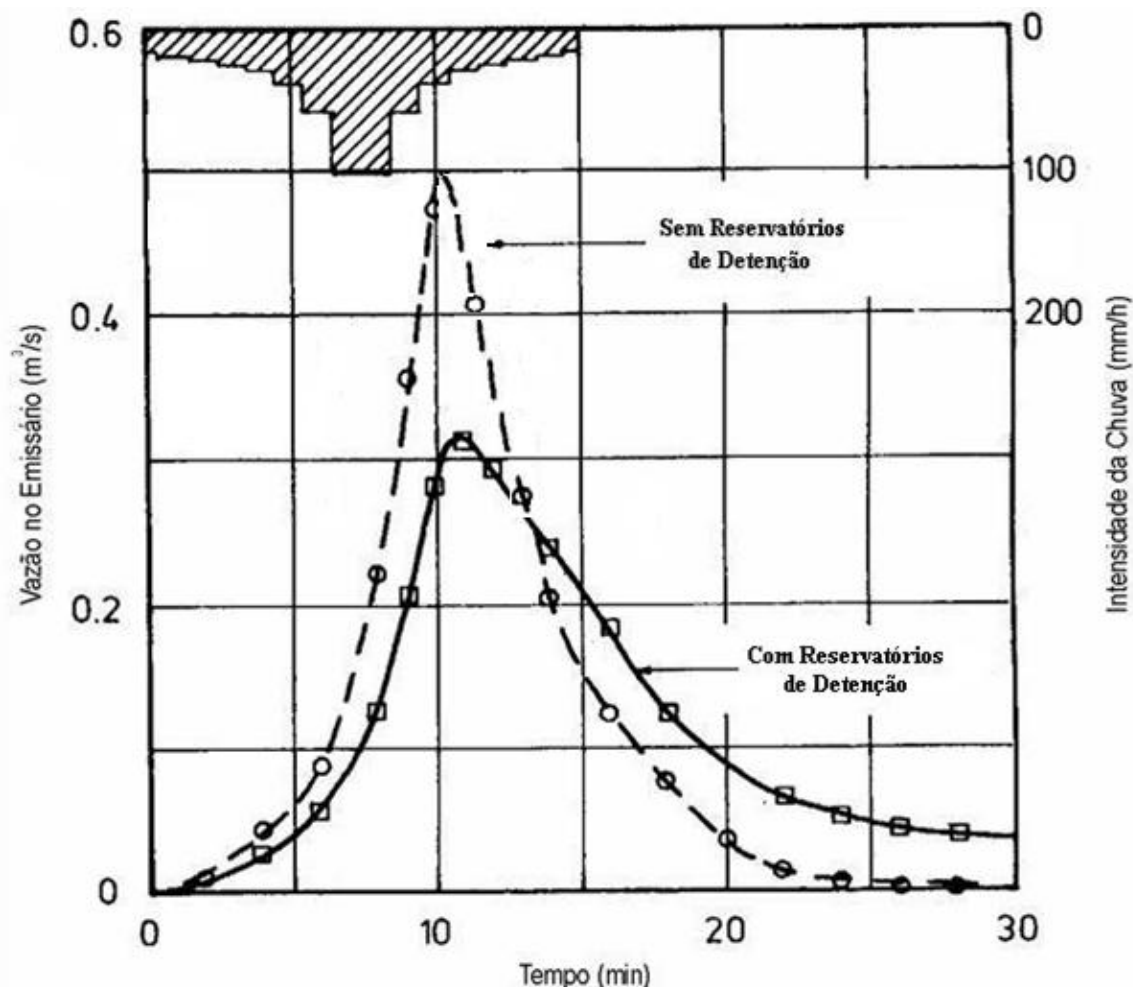


Figura 2.8 - Redução nas Vazões do Hidrograma de um Loteamento Residencial com 12 ha, Para uma Chuva de Projeto de 15 min e  $T_r = 2$  anos, na Inglaterra, com Todas as Casas Possuindo Reservatório de Detenção (Reservatório de Detenção:  $V = 0,34 \text{ m}^3$ ; Orifício Extravasor  $\varnothing = 1,0 \text{ cm}$ )

**Fonte:** FENDRICH (2002) *apud* BALMFORTH e BAILEY (1985)

BALMFORTH e BAILEY (1985) mostraram, por meio do estudo prático, que pequenos volumes de armazenamento em reservatórios de retenção domiciliares, conectados aos condutores verticais de águas pluviais, escoadas em telhados, são um meio muito eficiente na redução dos picos de vazão nos sistemas de drenagem urbana, quando comparados com os meios convencionais utilizados na drenagem urbana das águas pluviais, de redução ou atenuação dos picos do escoamento superficial das bacias hidrográficas.

O'LOUGHLIN *et Al.* (1995) pesquisaram a utilização do sistema em Sydney, na Austrália. Os autores mostram o aumento no número de municípios que adotaram o sistema em tão pouco tempo: 40 em 1995, sendo que em 1991

eram só 2. As grandes cidades do País, em seu desenvolvimento optaram por uma política que incentiva a ocupação múltipla dos lotes, com duas e até três unidades habitacionais e/ou comerciais, gerando altas densidades habitacionais, de modo se aproveitar o pequeno espaço disponível. Essa política de ocupação (como já mencionado) gera impactos que devem ser remediados de modo que os micro-reservatórios de retenção rapidamente passaram a ser exigidos pelos conselhos municipais. O conselho da bacia do alto Parramatta (Upper Parramatta River Catchment Trust - UPRCT), em seu manual sobre microreservatórios de retenção (UPRCT, 1994), recomenda instalações típicas como a mostradas na Figura 2.9. Trata-se de um microreservatório ligado paralelamente à saída para a rede de esgotos pluviais, dessa forma o reservatório só é utilizado quando a vazão de saída do lote ultrapassa o limite estabelecido pelo conselho municipal, este tipo de microreservatório é tratado na literatura por *off-line*. Os Autores citam que há cerca de 3.500 sistemas de micro-reservatórios de retenção (em 1995) instalados em Sydney, dos quais, 40% são recentes e possuem volumes de retenção entre 200 e 500m<sup>3</sup>/ha. Os Autores concluem que os micro-reservatórios de retenção distribuída contribuem de maneira eficiente na redução do escoamento superficial.

O'LOUGHLIN *et Al.* (1995) afirmam que a vantagem da utilização do reservatório paralelo refere-se a uma melhoria na qualidade das águas armazenadas no micro-reservatórios, uma vez que o escoamento mais poluído, o inicial, vai direto para a rede, e só depois o microreservatório de retenção passa a operar.

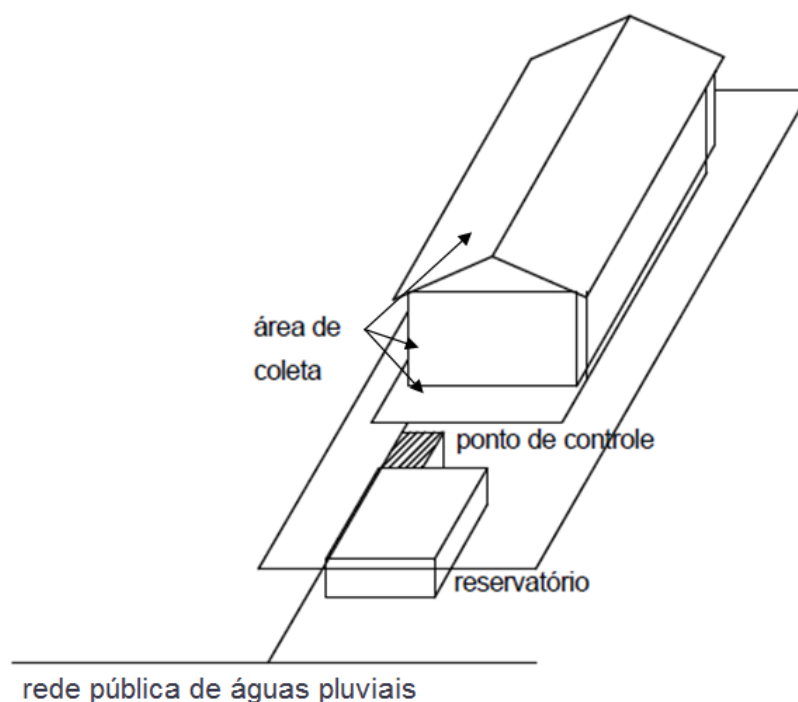


Figura 2.9 - Instalação típica de um microreservatório de retenção em Sydney  
(adaptado de O'LAUGHLIN *et Al.*, 1995)  
Fonte: O'LOUGHLIN *et Al.* (1995)

PILAR e BIAIN (2000) simularam uma área de  $500\text{m}^2$ , com declividade de 1% e totalmente impermeável, em Resistência, na Argentina. Os autores utilizaram um modelo de otimização para minimizar a área do reservatório com a restrição de lâminas inferiores a 45 cm, devido às características topográficas do local de aplicação. Foram obtidas reduções nas vazões de pico entre 25% e 63%. Os reservatórios ocuparam entre 2% e 4% da área de captação.

CRUZ *et Al.* (2000) utilizando lotes hipotéticos avaliaram os efeitos de diferentes taxas de impermeabilização sobre os hidrogramas de saída, as estruturas de descarga e o custo dos reservatórios.

Os resultados da simulação do impacto da urbanização mostram aumento nos picos de vazão da ordem de 17 a 45% e aumento de volume de 39 a 109% em relação aos valores de pré-ocupação, conforme visualizado na Figura 2.10 e na Figura 2.11.

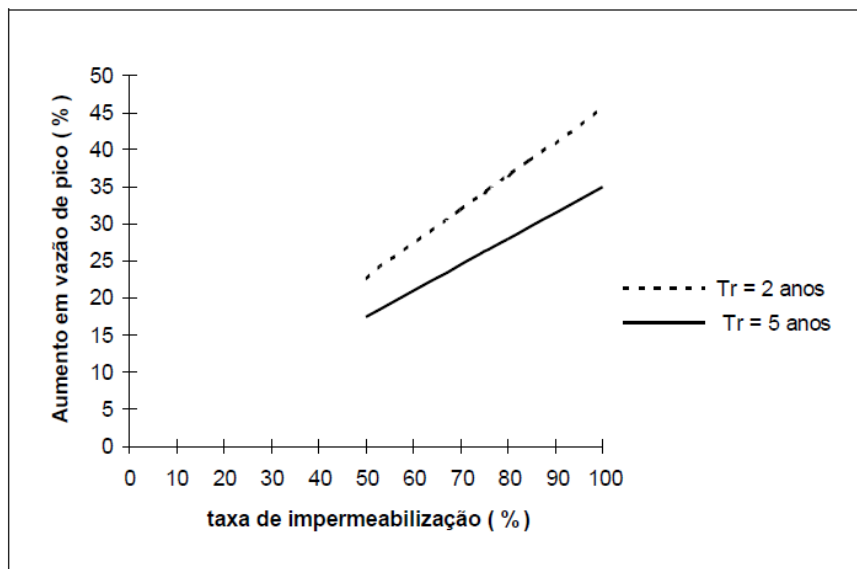


Figura 2.10 - Aumento da vazão de pico em função da impermeabilização  
Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)

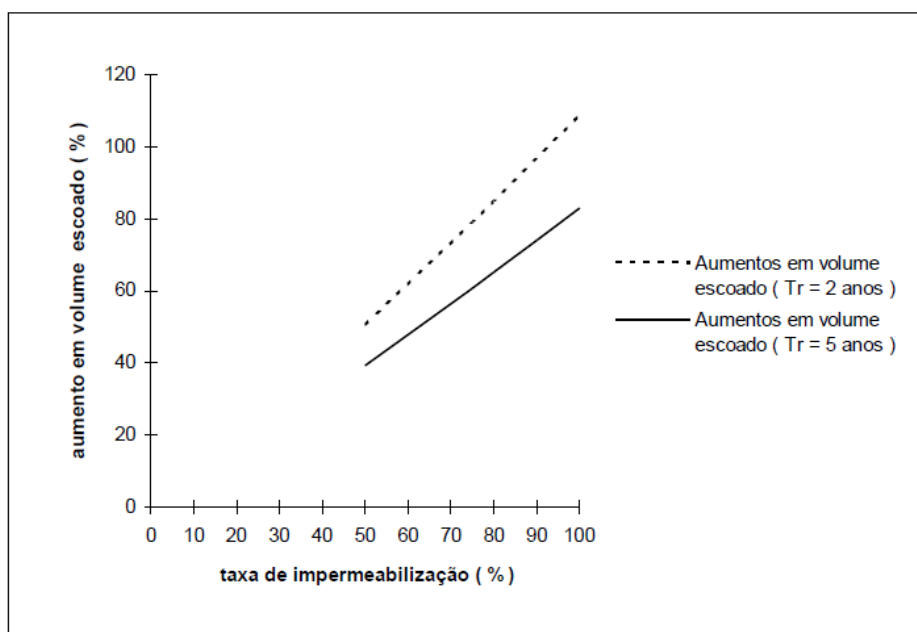


Figura 2.11 - Aumento do volume escoado em função da impermeabilização  
Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)

Para avaliação das estruturas de saída, foram projetados 6 tipos diferentes de reservatório com descarregador de fundo constituído de tubos de PVC em diâmetros comerciais de acordo com a necessidade, e vertedor com comprimento constante de 1 m, conforme na Figura 2.12 e na Figura 2.13.

De acordo com CRUZ *et Al.* (2000), os volumes de amortecimento para o lote de 600m<sup>2</sup> totalmente impermeabilizado, ficaram entre 2 e 2,5m<sup>3</sup>,

dependendo do tipo de estrutura, e a área ocupada em planta em relação à área total do lote não ultrapassou 1%. A título de ilustração apresenta-se os resultados das simulações para o reservatório lacrado com 1 m de profundidade e para o reservatório cilíndrico com 0,60 m de diâmetro, respectivamente na Tabela 2.10 e na Tabela 2.11, implantados em lote de 600 m<sup>2</sup>, com período de retorno de 5 anos.

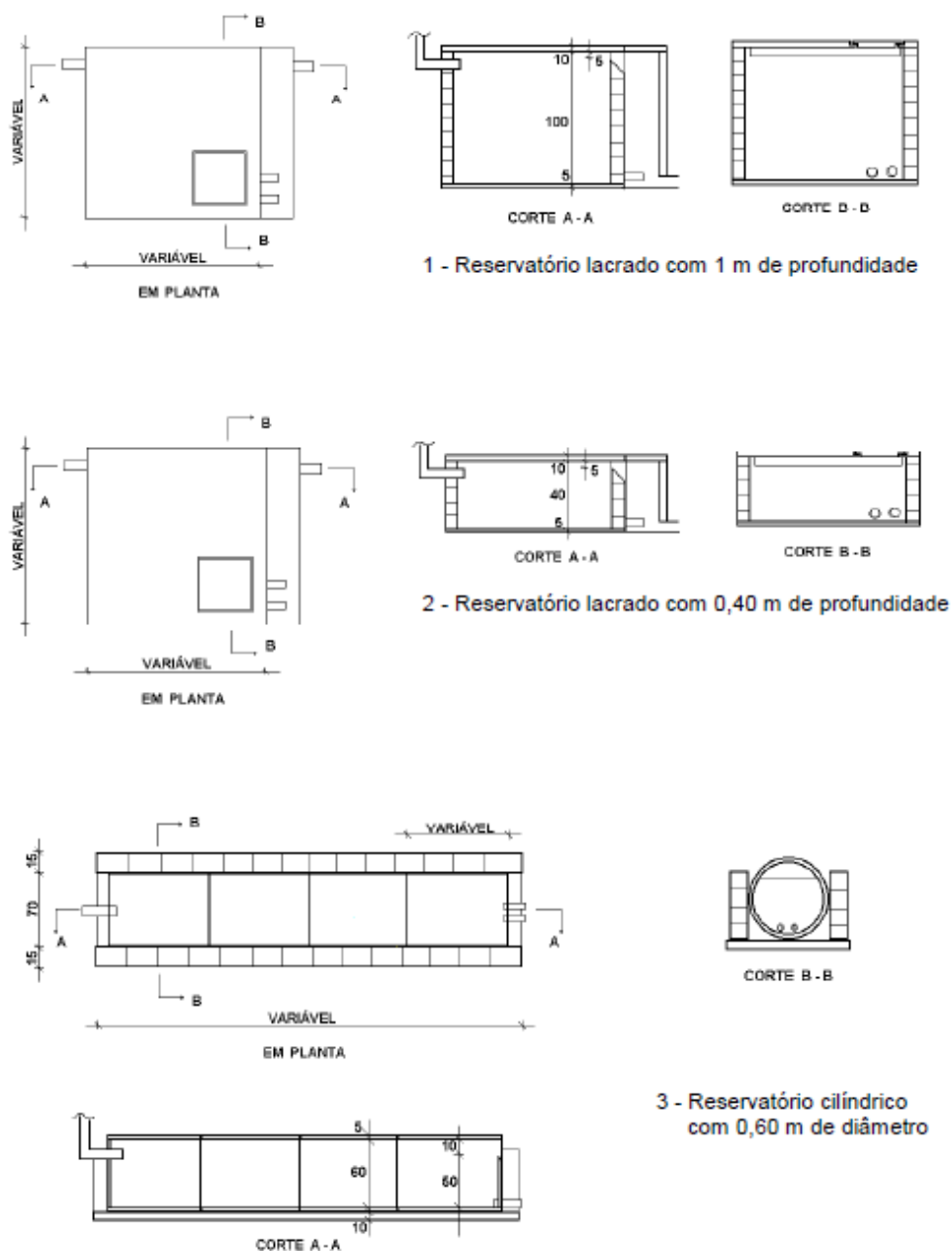
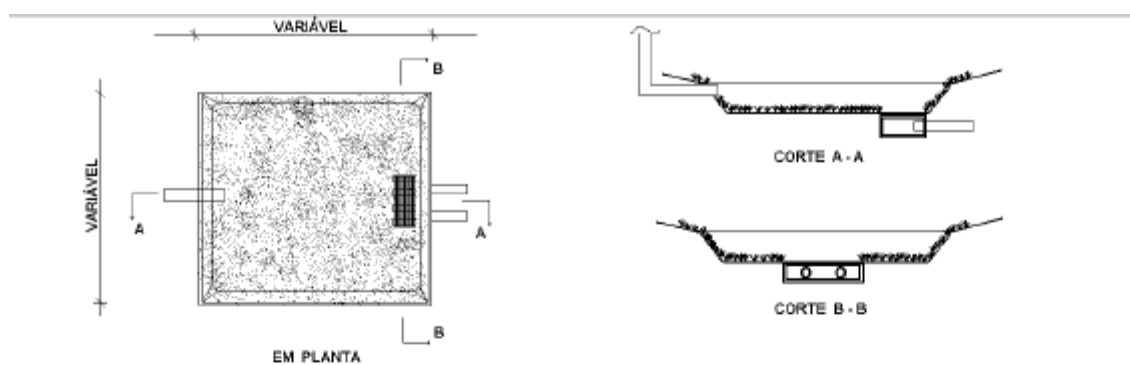
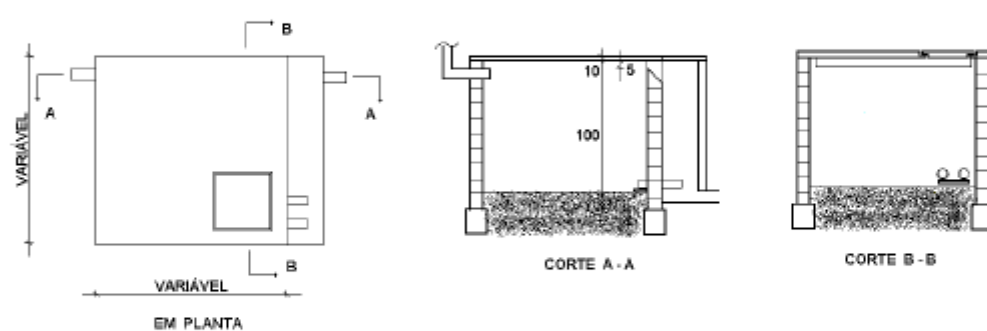


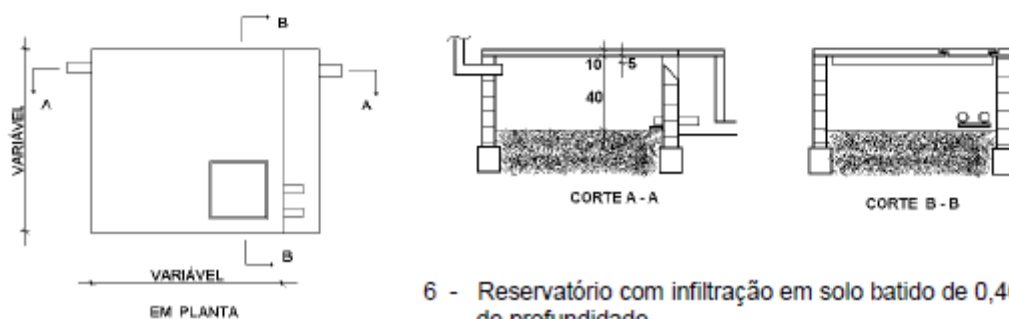
Figura 2.12 - Esquema construtivo dos reservatórios de retenção em lote  
Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)



4 - Reservatório aberto gramado



5 - Reservatório com infiltração em solo batido de 1 m de profundidade



6 - Reservatório com infiltração em solo batido de 0,40 m de profundidade

Figura 2.13 - Esquema construtivo dos reservatórios de detenção em lote  
Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)



Tabela 2.10 - Reservatório lacrado com 1 m de profundidade

Taxa de impermeabilização	Vazão sem detenção (l/s)	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Quantidade e diâmetro dos tubos	Vazão com detenção (l/s)	Tempo de detenção (min)
0	9,0	-	1D60	-	-
50	10,6	1,5	1D60	7,2	16
75	11,4	2,0	1D60	7,1	24
80	11,5	2,0	1D60	7,2	24
90	11,8	2,0	1D60	7,4	30
100	12,2	2,5	1D60	7,0	32

Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)

Tabela 2.11- Reservatório cilíndrico com 0,60 m de diâmetro

Taxa de impermeabilização	Vazão sem detenção (l/s)	Volume do reservatório (m <sup>3</sup> )	Quantidade e diâmetro dos tubos	Vazão com detenção (l/s)	Tempo de detenção (min)
0	9,0	-	-	-	-
50	10,6	1,5	3D40	7,1	15
75	11,4	1,5	1D75	8,7	16
80	11,5	2,0	3D40	7,2	19
90	11,8	2,0	3D40	8,3	19
100	12,2	2,0	1D75	8,4	20

Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)

O custo total de implantação dos diferentes tipos de reservatórios de 2,0 e 2,5m<sup>3</sup> pode ser apreciado na Tabela 2.12, onde se observa que os reservatórios subterrâneos ficaram em média entre US\$ 400 e US\$ 500, representando um custo 3 a 4 vezes superior ao do reservatório aberto e gramado, porém os custos de manutenção deste último pode levá-lo a atingir o custo das demais estruturas em 4 ou 5 anos.

CRUZ *et Al.* (2000) finalizam esclarecendo que a escolha entre um ou outro dispositivo de controle depende também do conhecimento das condições peculiares de cada lote urbano, como aspectos legais de ocupação, tipo de solo, profundidade do lençol freático, profundidade da rede coletora e recursos financeiros disponíveis.

Tabela 2.12 - Custo de implantação dos reservatórios de 2,0 e 2,5 m<sup>3</sup>

Tipo de reservatório	Volume (m <sup>3</sup> )	Custo total (US\$)
Reservatório lacrado de 1 m de profundidade	2,0	450,69
	2,5	522,65
Reservatório lacrado de 0,40 m de profundidade	2,0	531,33
	2,5	614,55
Reservatório cilíndrico de 0,60 m de diâmetro	2,0	551,55
	2,5	686,44
Reservatório gramado e aberto	2,0	139,51
	2,5	166,96
Reservatório de 1 m de profundidade em solo batido	2,0	409,62
	2,5	472,66
Reservatório de 0,40 m de profundidade em solo batido	2,0	442,87
	2,5	506,86

Fonte: CRUZ *et Al.* (2000)

TASSI (2002), estudando o efeito dos micro-reservatórios de lote sobre a macrodrenagem urbana, através da montagem de uma bacia hipotética, chegou às seguintes conclusões:

- a) Níveis de eficiência da bacia para diversas combinações de tempos de retorno e vazões de descarga, variam de 50 a 70%, de acordo com a vazão na saída dos lotes;
- b) Basicamente o mesmo grau de eficiência obtido ao controlar a vazão de pré-urbanização, pode ser alcançada ao fixar em até 3 vezes a vazão de pré-urbanização na saída do lote;
- c) A possibilidade de aumentar as vazões de saída dos lotes e, conseqüentemente o diâmetro do dispositivo de saída, constitui-se numa vantagem sobre as vazões menores que resultam em diâmetros muito pequenos e possivelmente inviáveis em situações reais;
- d) O custo da implantação conjunta de micro-reservatórios e redes de drenagem podem, em alguns casos, ser maior do que o custo de implantação simples de redes, sem micro-reservatórios;
- e) Vazões de restrição da ordem de 3 a 5 vezes a vazão de pré-urbanização levam à redução da diferença de custos observada no item anterior;havendo capacidade na rede coletora, a alternativa mais

adequada parece ser a utilização da vazão de restrição em torno de 3 vezes a vazão de pré-urbanização.

De acordo com TUCCI (2000), o volume de detenção necessário para reduzir a vazão às condições pré-existentes pode ser estimado com base na Equação (2.30):

$$V = (Q_d - Q_a) * t \quad (2.30)$$

Onde:  $V$  = volume de detenção ( $m^3$ );

$Q_d$  = vazão de pico pós - desenvolvimento ( $m^3/s$ );

$Q_a$  = vazão correspondente ao pré - desenvolvimento ( $m^3/s$ );

$t$  = tempo da precipitação que produz o maior volume, em min.

As vazões  $Q_d$  e  $Q_a$  são calculadas usualmente com o método racional, que utiliza a Equação (2.31):

$$Q = \frac{C \times I \times A}{3,6} \quad (2.31)$$

Onde:  $Q$  = vazão máxima ( $m^3/s$ );

$C$  = coeficiente de escoamento superficial;

$I$  = intensidade da precipitação (mm/h);

$A$  = área total da bacia ( $km^2$ ).

Portanto, o volume  $V$  necessário para reduzir a vazão às condições pré-existentes depende da precipitação, a qual é função da duração da chuva  $t$ .

Isolando a área que é um valor fixo para as duas condições de interesse, fazendo a conversão de unidades e substituindo a Equação (2.31) na Equação (2.30), obtém-se a Expressão (2.32):

$$\frac{V}{A} = \left[ 0,278 * C * \frac{a}{(t + b)^d} - Q_a \right] * t * 60 \quad (2.32)$$

Onde a duração  $t$  é usada em minutos e o volume é obtido em  $m^3/km^2$ .

Utilizando os dados da cidade de Porto Alegre – RS, para vários níveis de urbanização dos lotes e das áreas impermeáveis das bacias hidrográficas indicados na Tabela 2.13, TUCCI (2000) avaliou pela Equação 2.32 os valores dos volumes de retenção necessários para redução das vazões máximas, indicados na Tabela 2.14.

Tabela 2.13 - Impactos da urbanização nas bacias hidrográficas

Área impermeável no lote (%)	Área impermeável na bacia (%)	Aumento da vazão específica	Aumento do volume de escoamento superficial
7,0	20	6,52	2,15
20,0	30	9,65	3,22
33,3	40	12,9	4,29
46,7	50	16,24	5,36
60,0	60	19,65	6,44
73,3	70	23,14	7,51
80,0	80	26,67	8,58

Fonte: TUCCI (2000)

Tabela 2.14 - Volumes de retenção necessários em bacias hidrográficas urbanizadas de Porto Alegre- RS

Área impermeável no lote (%)	Área impermeável na bacia (%)	Volume de retenção (m <sup>3</sup> /ha)	Parcela da bacia da área para retenção (%)
7,0	20	50,64	0,26
20,0	30	83,41	0,42
33,3	40	120,2	0,60
46,7	50	160,38	0,80
60,0	60	203,55	1,04
73,3	70	249,41	1,25
80,0	80	297,72	1,50

Fonte: TUCCI (2000)

A última coluna da Tabela 2.14 apresenta a parcela da área necessária para a retenção das águas pluviais da drenagem urbana, considerando-se um reservatório com 2,0 m de profundidade.

De acordo com FENDRICH (2002), a aplicabilidade de um sistema de coleta, retenção, utilização e infiltração das águas pluviais é um instrumento importante no controle do balanço hídrico, como medida corretiva e mitigadora do impacto causado ao ciclo hidrológico local, pelas atividades humanas, nas

áreas urbanas com crescente impermeabilização dos solos das bacias hidrográficas.

Partindo da premissa de que a chuva armazenável na Bacia Hidrográfica Urbana do Rio Belém, discretizada para 42 km<sup>2</sup> de área de drenagem, é igual a sua chuva efetiva total, e a partir dessa determinou o volume da chuva armazenável na Bacia, para o ano de 2020, quando a taxa de impermeabilização dos solos será máxima,  $AI_{máx} = 86,64\%$ ,  $P_r = 23,7$  mm.

Concluiu que o volume de reservação necessário a minimização das enchentes urbanas na Bacia, por unidade de área de coleta, é  $C_r = 20,5$  mm/m<sup>2</sup>, nas litologias Formação Guabirotuba e dos Sedimentos Recentes e  $C_r = 18,5$  mm/m<sup>2</sup> para a Litologia do Complexo Cristalino. O volume de detenção distribuída das águas pluviais, na Bacia Hidrográfica Urbana do Rio Belém, obtido por FENDRICH (2002):

$$V = C_r \times A_c \quad (2.33)$$

Onde:  $V$  = volume de detenção distribuída das águas pluviais (m<sup>3</sup>);

$C_r$  = coeficiente de escoamento superficial das áreas de coleta das águas pluviais (mm/m<sup>2</sup>);

$A_c$  = área de coleta das águas pluviais (m<sup>2</sup>).

O volume dos reservatórios de detenção distribuída das águas pluviais na Bacia Hidrográfica Urbana do Rio Belém, em Curitiba - PR está resumido na Tabela 2.15.

Tabela 2.15 - Capacidade dos reservatórios de detenção distribuída das águas pluviais na bacia hidrográfica urbana do Rio Belém ( $A = 42$  km<sup>2</sup>). Curitiba – PR.

Área de Coleta  $A_c$ (m <sup>2</sup> )	Capacidade dos Reservatórios das Águas Pluviais		
	Formação Guabirotuba $V$ (m <sup>3</sup> )	Sedimentos Recentes $V$ (m <sup>3</sup> )	Embasamento Cristalino $V$ (m <sup>3</sup> )
10	0,20	0,20	0,18
100	2,05	2,05	1,85
1.000	20,50	20,50	18,50
10.000	205,00	205,00	185,00
100.000	2.050,00	2.050,00	1.850,00
1.000.000	20.500,00	20.500,00	18.500,00

Fonte: FENDRICH (2002)

O objetivo geral do trabalho de FENDRICH (2002), é visualizado, objetiva

e resumidamente, nas situações 1 e 2 da Figura 2.14, a prática desenvolvida na drenagem urbana convencional e, a nova abordagem proposta, para minimização das enchentes urbanas, nas bacias hidrográficas com altas taxas de impermeabilização dos seus solos, não só na cidade de Curitiba – PR, mas também em todo o Território Nacional.

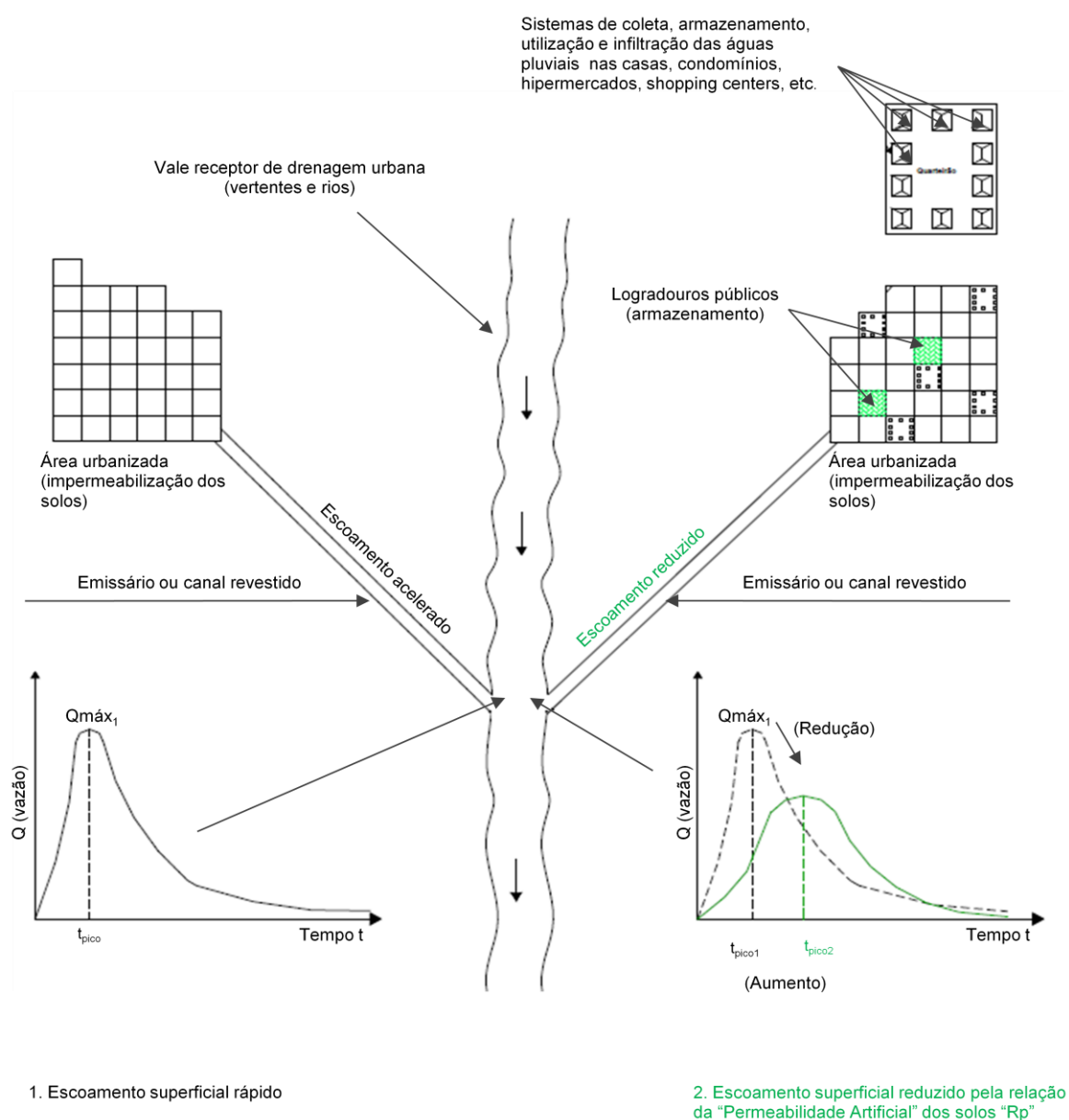


Figura 2.14–Detenção Distribuída das Águas Pluviais para Controle das Enchentes Urbanas na Cidade de Curitiba - PR

Fonte: FENDRICH (2002)

Quando uma cidade ou região apresenta freqüentemente inundações e os seus consequentes problemas, é necessária uma nova abordagem integrada e sustentável das questões relativas à água em meio urbano. A detenção distribuída das águas pluviais promove a gestão das águas pluviais ao mesmo tempo em que interage com os projetos urbanísticos do local; além disso, os potenciais benefícios advindos do seu uso estão ainda para ser adequadamente utilizados. Todo o anterior influenciou fortemente para escolher a detenção distribuída das águas pluviais como a matéria central deste trabalho.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para o trabalho compreende a Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, localizada na cidade de Medellín - Colômbia. A escolha desta região para estudo deveu-se às freqüentes inundações observadas nos últimos anos na região mais baixa da Bacia.

Pode-se também citar como fator importante para a escolha desse local, a falta de estudos e informações publicadas na região. Os dois únicos encontrados foram os trabalhos do INSTITUTO MI RIO (1995) e MONTROYA e PATIÑO (2001), ambos aplicados a bacias hidrográficas do Município de Medellín.

Além das características da Bacia em estudo, serão descritos também tópicos sobre a sua urbanização, enchentes e usos do solo no local.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MUNICÍPIO DE MEDELLÍN

O Departamento (Estado) de Antioquia na Colômbia abrange uma área de 63.612 km<sup>2</sup> no qual estão situados 125 municípios, que no ano 2010, de acordo com as projeções da população, divulgadas pelo *Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE*, tinha um pouco mais de seis milhões de habitantes, dos quais 77,29% viviam em centros urbanos.

Antioquia é a segunda maior economia regional da Colômbia, com uma estrutura produtiva especializada no setor de serviços financeiros, imobiliário e de negócios bem como na indústria e na construção (DNP, 2007).

A capital do Departamento de Antioquia é o Município de Medellín, Figura 3.1, que limita com 13 Municípios, dos quais, cinco fazem parte da *Área Metropolitana del Valle de Aburrá: Bello, Copacabana, Itagüi, La Estrella e Sabaneta*.

O Município de Medellín, tem uma área de 380 km<sup>2</sup>, está inserida na bacia hidrográfica do *Río Medellín*, correspondendo a 0,59% do território *Antioqueño* e a 32,88% da *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Está localizado nas coordenadas geográficas 75°34'05".752W de Longitude (Meridiano de Greenwich) e aos 6°13'55".098N de Latitude, com uma altitude média de 1479 m.s.n.m, medindo 26 km na extensão Leste-Oeste (Alcaldía de Medellín, 2013).





Figura 3.1 - Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Medellín é uma cidade que apresentou um crescimento demográfico acelerado a partir de meados do Século XX, devido ao conflito social e político que a Colômbia experimentou nessa época. Este fenômeno social fez com que o aumento da urbanização fosse intenso para todos os centros urbanos e que capitais de departamentos, como Medellín, estendessem seus limites a outras cidades vizinhas.

Deste fator, no ano de 1968 foi desenvolvida na Colômbia a formação de Áreas Metropolitanas, das quais a primeira no País foi a *Área Metropolitana Del Valle de Aburrá*, constituída por nove<sup>1</sup> cidades.

A evolução da população do Município de Medellín, segundo os censos oficiais do *Departamento Administrativo Nacional de Estadística* – DANE, está indicada na Tabela 3.1.

<sup>1</sup>Envigado tem conurbação com seus vizinhos, porém não faz parte da entidade administrativa denominada Área Metropolitana.

Tabela 3.1 - Evolução da população do Município de Medellín

<b>Ano do Censo</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Densidade Demográfica (hab/há)</b>
1905*	59.815	1,57
1912*	70.547	1,86
1918*	79.146	2,08
1928*	120.044	3,16
1938*	168.266	4,43
1951**	358.189	9,43
1964**	772.887	20,34
1973**	1.077.252	28,35
1985**	1.468.089	38,63
1993**	1.793.491	47,20
2005**	2.214.494	58,28

Fonte: (\*) História de Antioquia  
(\*\*) Censos DANE

O último censo oficial realizado na Colômbia foi no ano 2005, portanto, o período histórico compreende desde o ano 1905 até o ano 2005. O DANE tem determinado a projeção da população do Município de Medellín para os anos 2005-2030, que pode ser visualizada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Projeção da população 2005-2030 do Município de Medellín

<b>PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO</b>			
<b>Ano</b>	<b>População</b>	<b>Ano</b>	<b>População</b>
2005	2.214.494	2.018	2.521.818
2006	2.239.003	2.019	2.544.493
2007	2.265.244	2.020	2.569.007
2008	2.291.378	2.021	2.583.109
2009	2.317.336	2.022	2.598.779
2010	2.343.049	2.023	2.616.058
2011	2.368.282	2.024	2.634.988
2012	2.393.011	2.025	2.655.615
2.013	2.417.325	2.026	2.666.141
2.014	2.441.123	2.027	2.678.206
2.015	2.464.322	2.028	2.691.850
2.016	2.481.781	2.029	2.707.116
2.017	2.500.931	2.030	2.724.051

Fonte: Censo DANE (2005)

A área urbana da Cidade está dividida em seis setores, estes por sua vez são divididos em *Comunas*<sup>2</sup>, as quais somam um total de 16. Os setores na realidade não têm valor territorial, e só são usados para agrupar as Comunas de acordo com sua localização dentro da cidade. As comunas são divididas em bairros e áreas institucionais; a cidade tem 249 bairros e 20 áreas institucionais. O setor rural está dividido em cinco *Corregimientos*<sup>3</sup>, estes por sua vez, estão divididos em *veredas*<sup>4</sup>, conforme indicado na Figura 3.2.

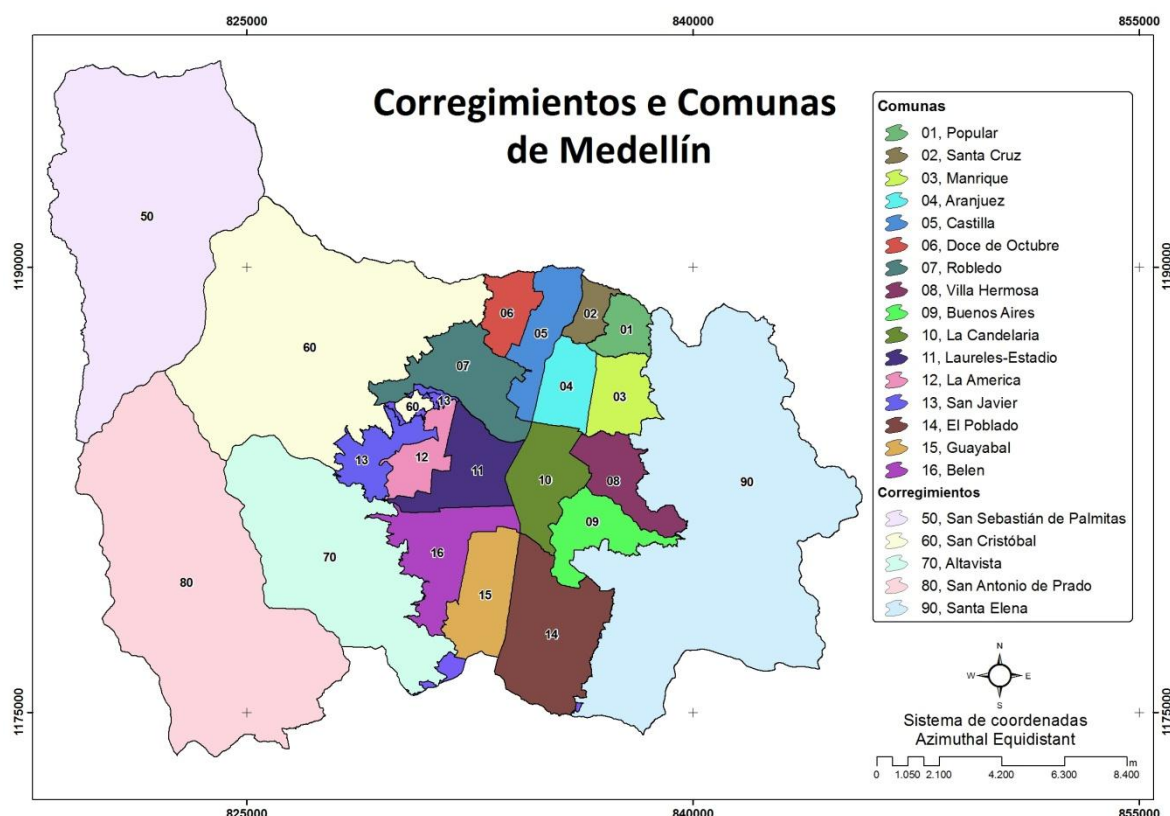


Figura 3.2 - Distribuição político-administrativa de Medellín  
Fonte: Alcaldía de Medellín, (2012)

A evolução populacional *Comuna a Comuna* do Município de Medellín, com base no Censo oficial DANE (2005) e na Alcaldía de Medellín, para os anos (1993, 2005-2030), está indicada no Apêndice 1.

<sup>2</sup> Comuna é uma unidade administrativa de uma cidade média ou principal que agrupa setores ou bairros determinados.

<sup>3</sup> Corregimiento é um centro urbano que não alcança a categoria de município.

<sup>4</sup> Vereda é outra divisão do Município ou cidade, localizada principalmente em setor rural

Segundo SCHNITTER (2006), nos últimos anos, a *Área Metropolitana del Valle de Aburrá* tem experimentado um crescimento rápido da população e um aumento na alocação de usos da terra com ocupação de áreas exclusivamente residenciais que cobrem cerca de 70% do uso do solo urbano.

A ocupação do território na região pode ser estudada a partir da fundação da *Villa de Nuestra Señora de La Candelaria de Medellín* em 1675, com base no sistema territorial construído no período pré-hispânico. No século XVIII, a Cidade desenvolveu-se consideravelmente devido a obras públicas que foram executadas, e no final do século XIX, Medellín passou de ser um centro comercial para um local industrial, que foi o motor do crescimento urbano nas primeiras décadas do Século XX.

A rápida expansão da Cidade geraria a preocupação já expressa nas décadas anteriores por uma elite da população no direcionamento do crescimento. E seria em 1948, que a cidade após várias décadas de discussão entendeu como necessário o planejamento urbano, contratou o seu desenvolvimento por meio de um Plano de Regulamentação.

Na época, a influência da arquitetura moderna no País levou à contratação de José Luis Sert e Lester Paul Wiener, para o desenvolvimento do Plano Piloto da Cidade. O plano proposto deveria identificar os critérios urbanos e as diretrizes gerais a serem seguidas para a reorganização da cidade e seu crescimento. Ele foi desenvolvido no quadro da Lei 88 de 1947, que incluía pela primeira vez na Legislação Colombiana, a obrigação de elaborar planos regulamentares para direcionar e reorientar o desenvolvimento urbano das cidades em municípios com um orçamento superior a 200.000 pesos. O plano introduziu conceitos tais como áreas industriais, centro cívico, a hierarquia de estradas, parques lineares, unidades de vizinhança em áreas residenciais e área metropolitana (Schnitter, 2006).

Medellín evoluiu num ritmo acelerado, adquirindo uma dinâmica que gerou em uma construção fragmentada, respondendo a diversos processos urbanos, legais ou ilegais.

Entre 1969 e 1971 foi realizado, pelo Escritório de Planejamento Municipal de Medellín, o estudo básico para o Plano Rodoviário de Medellín, que propunha um sistema arterial no centro urbano principal, incorporando o sistema arterial do rio, tornando-o cada vez mais como corredor multimodal, de

passagem livre e sistema de pontes com ligações de trevo. O estudo teve um enorme impacto sobre a estrutura nuclear-arterial de Medellín, fornecendo inclusive, ligações metropolitanas. A estrada teve um lugar de destaque na construção urbana. Foram realizados grandes projetos de estradas que mudaram a estrutura urbana. As estruturas de fluxo como rodovias, estradas arteriais e rotatórias tornaram-se o critério organizador da cidade (Schnitter, 2005).

Em 1974, o Escritório de Planejamento do Departamento de Antioquia formulou pela primeira vez as diretrizes para o documento “Planejamento Geral para o Desenvolvimento de Antioquia”, no qual foram definidas as propostas para o desenvolvimento territorial da Região Metropolitana.

Isso deu origem, no Governo de Antioquia, ao escritório responsável para projetar um "plano metropolitano", suportada pelas perspectivas de um conceito, "metropolização", que tinha alcançado desenvolvimento no mundo desde o início do Século XX, o que justificou para o Executivo regulamentar as funções básicas. A figura das Regiões Metropolitanas surge na reforma constitucional de 1968, com a Lei 61 de 1978, e pela *Ordenanza* n.º 034 de 1980, que dispõe sobre o funcionamento da *Área Metropolitana del Valle de Aburrá*.

Em 1982, o prefeito de Medellín, pelo Decreto No. 040 reestruturou o Departamento de Planejamento Municipal para cumprir as funções de planejamento metropolitano e fortalecer o planejamento de todo o território desde o núcleo central. Assim, a localização de áreas para expansão, especialmente para habitação social, bem como a localização das instalações de caráter metropolitano (aeroporto, aterro, metrô, entre outros.) estão situadas em outros municípios, atendendo à demanda de Medellín. Isso influenciou fortemente sobre o crescimento acelerado dos municípios vizinhos de Medellín, e gerou rapidamente o fenômeno da conurbação física das áreas urbanas.

Em 1985, foi formulado o Plano de Desenvolvimento Metropolitano "para a consolidação da metrópole", que estabelece sete estratégias regionais para a consolidação da metrópole e da região. Disso, derivou a formulação de planos de uso do solo para o setor norte e sul, que traçou uma proposta para o arranjo físico do Vale de Aburrá. Paralelo a isso, em 1988, é emitido o Estatuto Metropolitano de Planejamento, Uso do Solo, Desenvolvimento Urbano e Construção para a Área Metropolitana do Vale de Aburrá, o que permitiu, pelo

menos, unificar as condições de construção e urbanização dos municípios do Vale de Aburrá.

Na Década de 90, ocorreram eventos que transformaram fortemente o desenvolvimento e os processos de ordenamento do território. Em primeiro lugar, foi promulgada uma nova Constituição, que transformou o Estado paternalista em um estado participativo, tornando o município em protagonista do desenvolvimento, dando maior autonomia aos processos em seu território. Em 1993 foi estabelecida a Lei 99 e o Sistema Nacional Ambiental; de outra forma foram reforçadas legalmente as Áreas Metropolitanas, com a Lei Orgânica 128 de 1994, que concedeu a função de planejador do território, com responsabilidades claras sobre o desenvolvimento territorial. Finalmente, foi alterada a Lei 9 de 1989 de reforma urbana, com a lei 388 de 1997, que obrigou os municípios a formular Planos de Ordenamento do Território dentro de sua jurisdição (Schnitter, 2006).

Assim começa um período de grande influência no planejamento no componente físico e do espaço. A primeira geração de Planos de Ordenamento do Território foi formulada entre 1999 e 2001, como uma primeira aproximação ao território como uma plataforma para o desenvolvimento econômico e sócio-cultural, e a possibilidade de harmonizar o desenvolvimento urbano com o ambiente natural.

### 3.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO

#### 3.2.1 Localização

A Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego La Hueso situa-se no centro-oeste do Municipio de Medellín, Departamento de Antioquia – Colômbia (Figura 3.3), entre as latitudes 6°15'30"N e 6°16'0"N e as longitudes 75°36'30"W e 75°39'0"W.

A bacia está localizada nas comunas Laureles-Estadio, La América, San Javier e os Corregimientos de San Cristobal e Altavista.

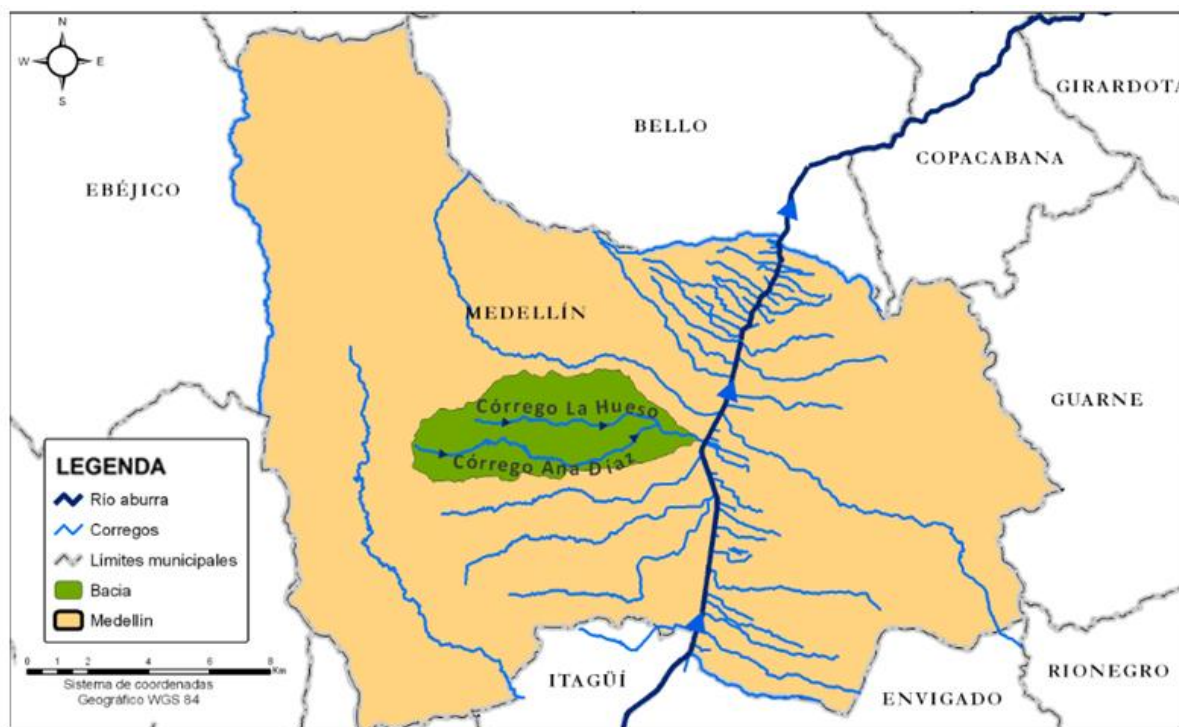


Figura 3.3 - Localização da Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego La Hueso no Município de Medellín (A= 23,63km<sup>2</sup>)

### 3.2.2 Características fisiográficas

As principais características físicas da Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego La Hueso estão indicadas na Tabela 3.3. O comprimento do canal principal do córrego é de 8,56 km da sua nascente na lâmina formada naserra do “Padre Amaya” e o “Alto del Astillero” na cota topográfica 2480 metros sobre o nível do mar, até que desemboca no rio Medellín (também chamado rio Aburrá) na cota 1463 metros sobre o nível do mar (Alcaldía de Medellín, 2011).

De acordo com a ALCALDÍA DE MEDELLÍN (2011), o Córrego La Hueso nasce a 2480 msnm e tem uma área de 23,63 km<sup>2</sup>, da qual 41,40% se encontra em solo rural, 50,80% em solo urbano e 7, 80% em solo destinado para expansão. A bacia possui forma ovalada na direção oeste-leste, com drenagem altamente desenvolvida na sua margem direita. A Bacia Hidrográfica apresenta um padrão de drenagem subdendrítico, característica das rochas ígneas como o Stock de Altavista e o Neis da *Iguaná*, e apresenta numerosos trechos de córregos controlados por estruturas geológicas.

Tabela 3.3 - Características Físicas da Bacia Hidrográfica Urbana do Córrego La Hueso

CARACTERÍSTICA FÍSICA		VALOR
01.	Área total da Bacia	$A=23,63 \text{ km}^2$
02.	Extensão do córrego La Hueso	$L= 8,56 \text{ km}$
03.	Perímetro da Bacia	$P=23,68 \text{ km}$
04.	Ordem da Bacia	4ª ordem
05.	Densidade de Drenagem	$D_d = 4,9 \text{ km/km}^2$
06.	Altitude máxima	2480m
07.	Altitude média	1870m
08.	*Altitude mínima	1463m
09.	Coeficiente de Compacidade	$K_c= 1,32$
10.	Fator de forma	$K_f = 0,22$
11.	Declividade média da Bacia	0,1188 m/m

Fonte: Alcaldía de Medellín (2011).

Segundo MONTROYA e PATIÑO (2001), a Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso na sua parte superior é caracterizada por ter um canal retilíneo, de talvegue pouco profundo, que vai se aprofundando na forma em “V”, tornando-se também sinuoso na direção de jusante. Possui declives acentuados com inclinações de até 60% que se suavizam nas outras regiões até 30%, e observa-se a presença de erosão nas margens o que desestabiliza os taludes.

A parte média da bacia que compreende os níveis topográficos de 1700m à 1500m tem inclinações variáveis entre 30% e 15%. As encostas são desenvolvidas sobre o Compartimento Geológico Batolito de Altavista, altamente fraturado o que permite seu uso como material pétreo. Há relatos de movimentos de massa devidos à alta meteorização e saturação da água no solo, deslizamentos de terra antigos e recentes, causados principalmente por atividades humanas (pedreiras).

Na parte baixa localizam-se os depósitos aluviais, com faixas de inclinação entre 3% e 15%, na qual o desenvolvimento transformou completamente o córrego natural por meio de canalizações (Montoya e Patiño, 2001).

### 3.2.3 Caracterização climática

Toda a área urbana e parte da área rural da Bacia encontra-se na *Zona de VidaBosque Húmedo Premontano* (bh-PM) da classificação Holdridge. Essa zona apresenta um intervalo de precipitação entre 1000 e 2000 mm/ano, nível



altitudinal entre 1000 e 2000 msnm e biotemperatura entre 18°C e 24°C.

A área rural apresenta também a *Zona de Vida Bosque Húmedo Premontano* (bh-PM) e a *Zona de Vida Bosque Húmedo Montano Bajo* (bh-MB) com intervalo de precipitação entre 1000 e 2000 mm/ano, nível altitudinal entre 2000 e 3000 msnm e biotemperatura entre 12°C e 18°C. Esta zona situa-se nas partes altas da Bacia. (Alcaldia de Medellín, 2011).

#### 3.2.4 Vegetação

Segundo a ALCALDIA DE MEDELLÍN (2011), a vegetação predominante da Bacia são pastagens e floresta natural fragmentada, seguido de mosaicos de cultivos, floresta plantada e arbustos. As pastagens correspondem a extensas áreas que dominam a paisagem das encostas da bacia; essas áreas são utilizadas para alimentar o gado através de sistemas extensivos de pastoreio típicos da região.

A floresta natural fragmentada refere-se a florestas e arbustos, localizados principalmente nos topos das montanhas bem como nas encostas de inclinação elevada. Algumas espécies que fazem parte deste tipo de florestas são plantas madeireiras como o *Caunce*, *Magnolio de monte*, *Cedro de montanha*, *Laurel comino* e o *Roble de tierra fria*.

Mosaicos de Cultivos são compostos principalmente de pequenas parcelas com cultivos de cebola, flores e alguns legumes, como couve, espinafre, abobrinha e tomate fruta, entre outros.

A floresta plantada corresponde a plantações de pinheiros, ciprestes e eucaliptos. A maioria são plantações comerciais, embora em algumas partes essas plantações tenham a função de proteção ou fazem parte de limites amplos entre pastagens ou entre propriedades (Alcaldia de Medellín, 2011).

#### 3.2.5 Caracterização geológica

O Valle de Aburrá encontra-se localizado sobre a cadeia de montanhas dos Andes, ao norte da Cordilheira Central, no Departamento (Estado) de Antioquia, na região noroeste da Colômbia.

Segundo ARISTIZABAL e YOKOTA (2008), o Valle consiste em um embasamento metamórfico Paleozóico, rochas ígneas ultrabásicas, uma sequência vulcão - sedimentação, corpos graníticos intrusivos e depósitos de vertentes e aluviais. O embasamento metamórfico, composto principalmente de sequências intercaladas de xisto, anfíbolitos e gnaisses, foi obducido durante o Cretáceo por corpos alongados de composição dunítica, basaltos e sedimentos de origem marinha, fortemente afetados tectonicamente. Além disso, tonalito e granodiorito Cretáceo e Triássico de composição ácida a intermediária, penetraram este complexo corpo metamórfico.

Morfológicamente, o Valle é definido como uma depressão norte-sul de fundo plano, localizado no topo da Cordilheira Central, limitado por suportes laterais muito inclinados em rocha e cobertos na parte inferior por um fluxo de lodo. O interior do vale é caracterizado por terraços, planícies aluviais ao longo do rio Medellín e depósitos alúvio-torrenciais, formando leques ao longo de seus principais afluentes.

De acordo com o MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2001), no Departamento de Antioquia, afloram unidades-rocha metamórficas, ígneas e sedimentares, cujas idades foram atribuídas a partir do Proterozóico ao recente. Do mapa geológico do Departamento de Antioquia, e por meio de geoprocessamento, foi discretizada a Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso (Figura 3.4).

Pode-se observar na Figura 3.4, que na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso encontram-se três tipos de litologia: *Complejo Cajamarca* (Pzes), Stock de Altavista (Kida) e Aluviones Recientes (Qal).

*Complejo Cajamarca* é um grupo de rochas metamórficas com evidências de ter sido submetido a vários eventos metamórficos, o que é refletido tanto na paragênese metamórfica quanto nas características da textura e idades isotópicas. O *Complejo Cajamarca* está constituído de rochas metasedimentárias, quartzo, silícios básicos ricos em alumínio, com alguns corpos calcários.

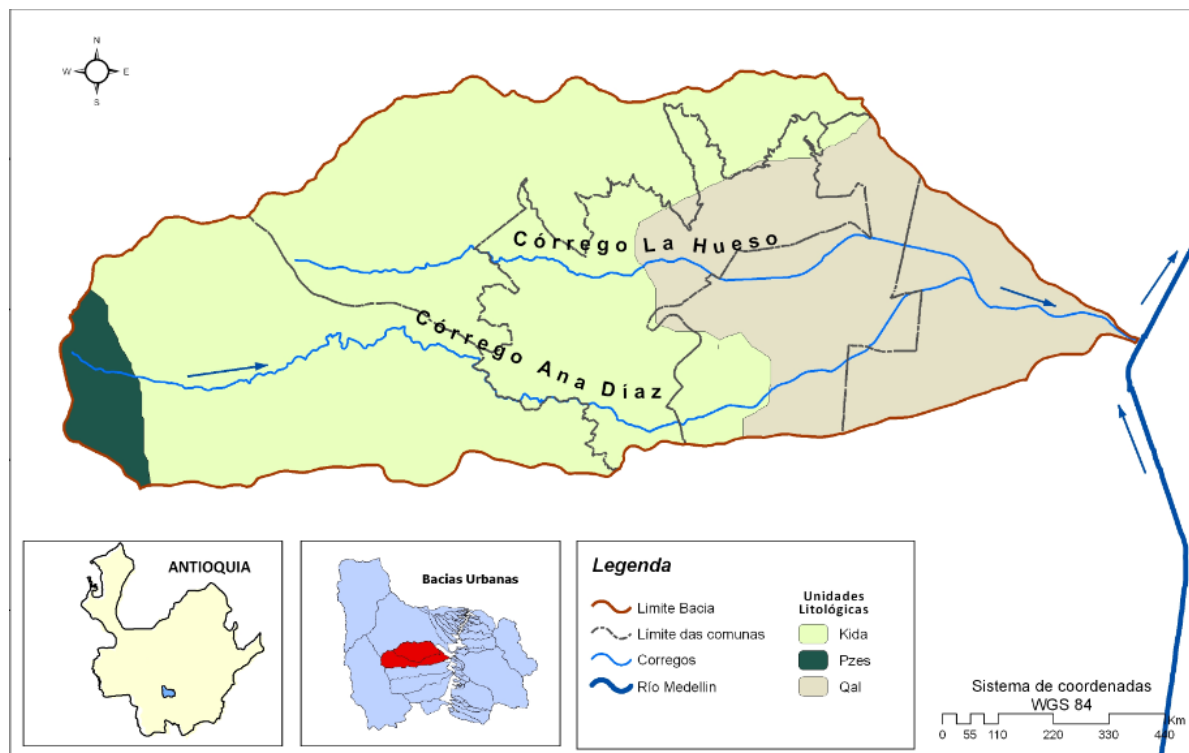


Figura 3.4 - Unidades litológicas na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

Stock de Altavista é uma formação de rocha ígnea de composição e textura muito heterogênea, onde se podem encontrar dioritos hornblenda, cuarzo dioritas e gabros, com texturas desde fanerítica grossa até afanítica. Os minerais predominantes são plagioclásio e ortoclásio além de hornblenda, quartzo, biotita, titanita, apatita, zircão, magnetita, e ilmenite. Os solos residuais geralmente podem chegar a mais de 20 m de espessura com predomínio de silte argilosos na superfície de cores amarelas e brancas e variações em profundidade de silte-arenoso ou areia siltosa cinza; é comum encontrar "bolas" de rocha embutidas no manto residual. As inclinações moderadamente altas, o desmatamento e a exploração de pedreiras criam condições favoráveis para a erosão.

Aluviones Recientes (Qal) são depósitos não consolidados de material aluvial e coluvial de pequena espessura nas gargantas de alguns riachos e rios, mas atingem grande espessura e extensão, na metade inferior de grandes rios. Eles são formados por camadas de silte, areia e pedregulhos de rochas adjacentes aos canais principais dos rios.

Segundo a UNAL (2009), para estimar a permeabilidade do solo em todo o Município de Medellín, foram executados testes de classificação e de permeabilidade tipo *Porchet* em uma região alvo, a fim de obter para cada ponto de amostragem um valor de permeabilidade e um valor do índice de plasticidade do solo, ou diâmetro efetivo para solos finos e grossos. Isto a fim de encontrar uma correlação entre a permeabilidade e parâmetros índices dos solos finos e grossos, de modo que estimaram indiretamente a permeabilidade do solo do resto do Município de Medellín. A correlação foi obtida por meio de Redes Neurais Artificiais, e com essa informação foi gerado um mapa espacial contínuo desta variável. Do mapa de permeabilidade para o Município de Medellín foi extraída a informação correspondente à bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, a qual está indicada na Figura 3.5.

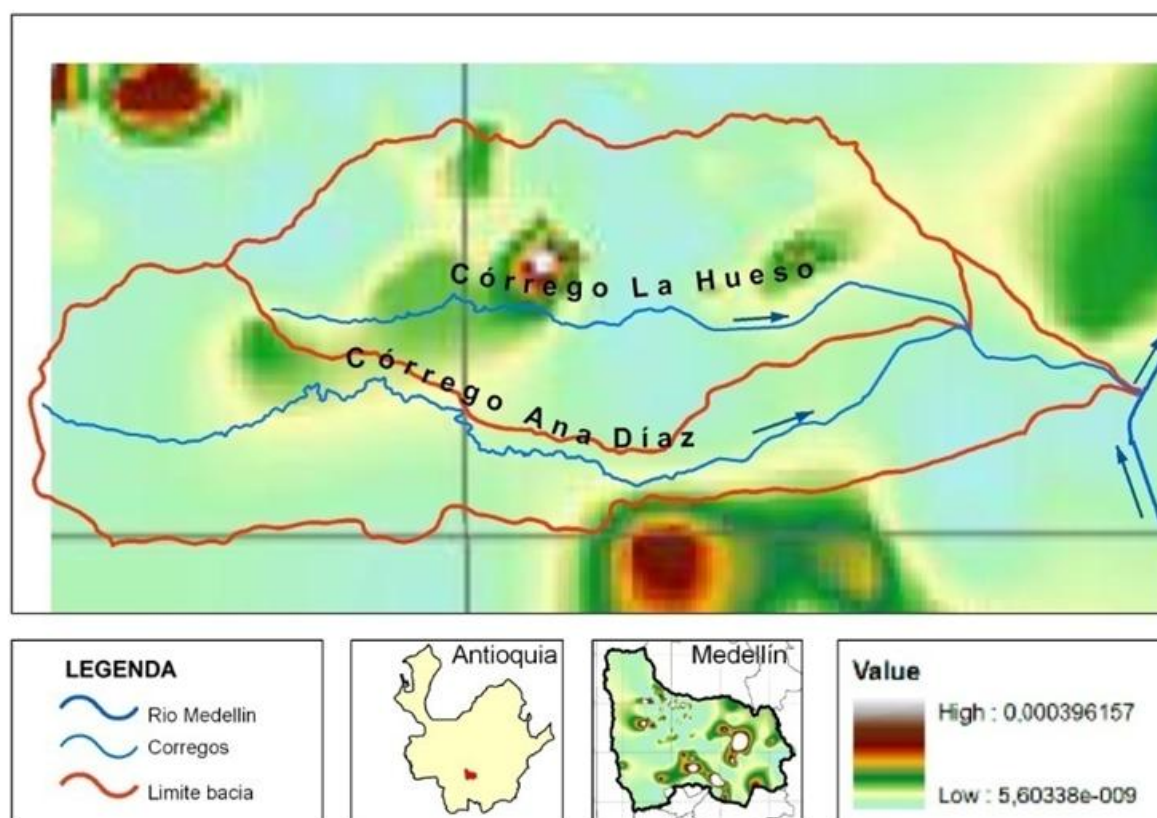


Figura 3.5 -Mapa de permeabilidade da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

Na escala de valores da permeabilidade no mapa, em cm/s, observa-se que a região da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso está em terrenos associados a permeabilidades muito baixas, da ordem de  $5,60 \times 10^{-9}$  segundo a

UNAL (2009), o qual é indicador da baixa capacidade de infiltração dos solos da bacia.

De acordo com GIUSTI (2012), as unidades litológicas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, Stock de Altavista e Aluviones Recientes, apresentam características e valores do Coeficiente de Permeabilidade  $K$ , como podem ser observados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Coeficientes de Permeabilidade das unidades litológicas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

Unidade Litológica	Era Geológica	Características	Coeficiente de permeabilidade (K) (cm/s)
Stock de Altavista (Kida)	Quaternário	Solos argilosos	$10^{-6} - 10^{-5}$
Aluviones Recientes (Qal)	Cretáceo Inferior	Cascalhos e areias	$10^{-4} - 10^{-3}$

Fonte: GIUSTI (2012)

Segundo os valores apresentados na Tabela 3.4, e de acordo com UNAL (2009), o grau de permeabilidade dos solos, segundo seus valores de coeficiente de permeabilidade  $K$ , a bacia hidrográfica do Córrego La Hueso tem, em geral, solos de baixa e média permeabilidade.

### 3.2.6 Urbanização

A urbanização na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, está intimamente ligada aos processos demográficos e do uso e ocupação dos solos do Município de Medellín, conforme descrito anteriormente.

### 3.2.7 Uso do solo

De acordo com o *Plan de Ordenamiento Territorial- POT* (2006) da cidade de Medellín, o solo do território municipal é classificado como solo urbano, solo rural e solo de expansão urbana. Na área do solo rural poderia se estabelecer a categoria de solo suburbano, e em todas as classes de solo, o solo de proteção ambiental. Essa classificação pode ser observada no mapa “Usos Gerais do Solo do Município de Medellín”, no POT (2006).

Conforme as disposições do POT, art. 112, na área do solo rural são as terras inadequadas para uso urbano devido a sua atribuição para a agricultura, uso pecuário, silvicultura, exploração de recursos naturais e atividades similares. Coerente com isso, a área rural com esta designação exclui áreas urbanas e de expansão. Dentro de área do solo rural são delimitadas as classes de solo de Proteção e solo suburbano.

O solo de Proteção (POT, art.115) é o que por seu contexto geográfico, ambiental ou pela beleza paisagística, ou por fazer parte de uma área de utilidade pública para a localização de infra-estrutura para a prestação de serviços públicos, ou por fazer parte das áreas de ameaça e riscos, que não podem ser mitigados para a localização de assentamentos urbanos, tem restringida a possibilidade de ser urbanizado. Estabelecem-se como Solo de Proteção as seguintes categorias:

- a) Áreas aptas para silvicultura;
- b) Áreas de proteção a mananciais;
- c) Áreas de alto risco não recuperável;
- d) Áreas de reserva para a localização de serviços públicos;
- e) Reservas da Sociedade Civil.

Na Figura 3.6, observa-se que na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, podem ser encontradas as classificações de solo Urbano e Rural, nesse último, especificamente, solos de uso florestal protetor-produtor; florestal protetor; exploração de materiais; uso misto urbano-rural e setor de alto risco, não recuperável.

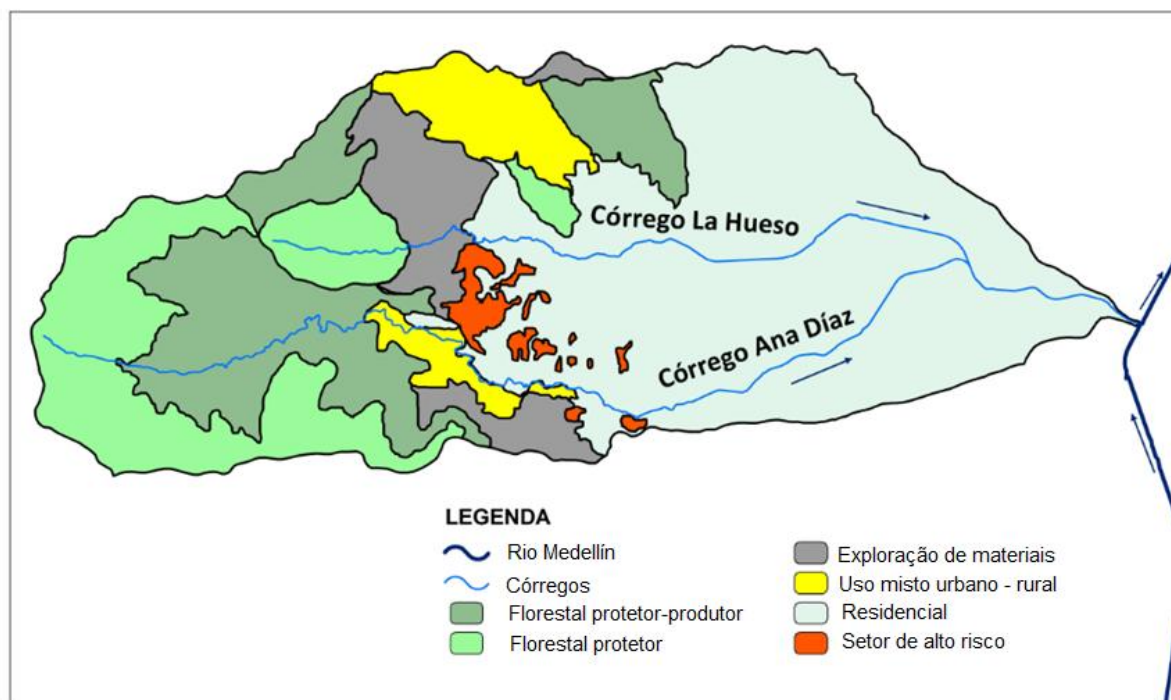


Figura 3.6 - Usos Gerais do Solo na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

A relação dos usos do solo da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso e as comunas correspondentes à bacia podem ser observadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Uso do Solo nas Comunas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.

Comuna	Uso do Solo		
	Rural/Protetor (ha)	Urbano (ha)	Área Total (ha)
Laureles-Estadio	0,00	251,00	251,00
La America	0,00	362,00	362,00
San Javier	28,00	427,00	455,00
San Cristobal	485,00	95,00	580,00
Altavista	710,00	5,00	715,00
Total	1223,00	1140,00	2363,00
% da Bacia	51,76	48,24	100,00

### 3.2.8 Enchentes Urbanas

De acordo com HERMELIN *et Al.* (2002), o Córrego La Hueso e o Córrego Ana Díaz são dois dos dez afluentes do Río Medellín que apresentam maior índice de ocorrência de inundações. Esses córregos têm sofrido grandes mudanças, tanto por processos naturais como por antrópicos nos últimos 130



anos; a primeira dessas mudanças ocorreu em 1880, quando uma inundação torrencial mudou o curso do Córrego La Iguaá, que na época era um afluente do Córrego La Hueso; por sua vez, a intervenção humana mudou o curso original do Córrego, que atualmente conflui com o Córrego Ana Díaz. Além disso, os córregos têm sido canalizados em grande parte do seu percurso.



Figura 3.7—Córrego La Hueso. Mudança de canal trapezoidal para retangular na *Carrera*<sup>5</sup> 73, na linha B do metrô.

Fonte: Alcaldia de Medellín, 2011

Esses dois córregos são especialmente reconhecidos pelos *Medellinenses*, especialmente pela alta frequência de transbordamentos durante a estação chuvosa. Através dos anos, esses córregos têm apresentado inúmeros transbordamentos que trazem danos materiais e às vezes perdas humanas. Esses efeitos são geralmente atribuídos ao mau planejamento no momento de construção de casas próximas ao leito dos córregos.

De acordo com ARISTIZABAL e GÓMEZ (2007), até meados dos anos 1990 não estavam disponíveis na América Latina, e nem na sub-região andina informação sistemática sobre a ocorrência de desastres cotidianos de pequeno e médio impacto. A partir de 1994 começou-se a construir uma estrutura metodológica comum por grupos de pesquisadores, acadêmicos e instituições, agrupados na Rede de Estudos Sociais em Prevenção de Desastres na América

---

<sup>5</sup> Sistema de ruas na direção norte-sul.



Latina (*LA RED*), que conceberam um sistema de aquisição, consulta e exibição de informações sobre desastres de pequenos, médios e grandes impactos, com base em fontes de dados pré-existentes, da imprensa e relatórios de instituições em nove países de América Latina. Essa ferramenta conceitual e metodológica para a construção de bases de dados de perdas, danos ou efeitos causados por emergências ou desastres foi chamada Sistema de Inventário de Desastres – DesInventar.



Figura 3.8 - Córrego La Hueso. Passarela de pedestres (Estação do metrô Suramericana)

Fonte: Jornal El Colombiano (23/11/2010)

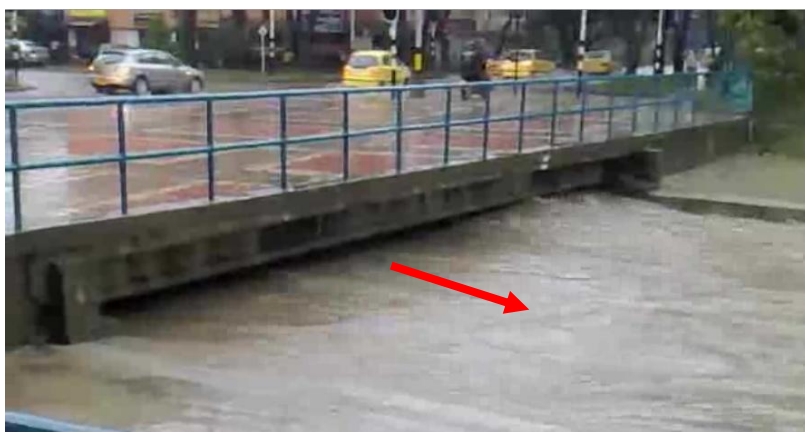


Figura 3.9 - Córrego La Hueso. Vista da estação do metrô Suramericana, com destaque na Carrera 65.

Fonte: Autora (23/11/2010)

A *Área Metropolitana del Valle de Aburrá* implementou uma base de dados de desastres, usando o software DesInventar, que está atualizado até o ano 2010. Esse sistema integra bases de dados desenvolvidas pela

Universidade EAFIT (*Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico*) de Medellín e o Sistema Municipal de Prevenção e Atenção a Desastres, SIMPAD. A atualização de dados é feita diariamente, na qual estão incluídos os registros de eventos publicados em jornais locais e nacionais, relatórios de comissões locais de emergência e da comunidade.

A *Área Metropolitana del Valle de Aburrá* facilitou o desenvolvimento desse projeto. O endereço eletrônico da base de dados de desastres (<http://online.desinventar.org/desinventar/#COL-20120530190858>), no qual foram consultados todos os eventos de inundação e fluxos torrenciais registrados na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, que são apresentados na Tabela 3.6. Os eventos do ano 2011 mostrados na mesma tabela foram procurados no jornal local, El Colombiano.

Tabela 3.6 - Eventos de inundação na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

Ano	Mês	Dia	Fonte
1981	Nov	21	DesInventar
1988	Mar	8	DesInventar
1988	Set	17	DesInventar
1988	Nov	22	DesInventar
1989	Nov	30	DesInventar
1993	Nov	3	DesInventar
1996	Out	3	DesInventar
1996	Out	30	DesInventar
1997	Abr	6	DesInventar
1998	Abr	2	DesInventar
2002	Mai	20	DesInventar
2007	Nov	23	DesInventar
2008	Jun	10	DesInventar
2008	Set	25	DesInventar
2009	Out	19	DesInventar
2009	Nov	16	DesInventar
2010	Nov	23	El Colombiano
2010	Dez	1	El Colombiano
2011	Ago	19	El Colombiano
2011	Set	24	El Colombiano
2011	Dez	19	El Colombiano

Fonte: Base de dados de desastres *DesInventar* (2012).

Observa-se da Tabela 3.6, que cerca de 60% dos eventos chuvosos críticos ocorrem no período compreendido entre os meses de Outubro e Dezembro, isto é, na estação chuvosa da região.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo tem por objetivo a descrição completa dos materiais e da metodologia empregada para o estudo de um sistema de retenção distribuída das águas pluviais na drenagem urbana, visando ao controle das enchentes. Os principais materiais utilizados foram os dados de população do Município de Medellín, a Geodatabase Ambiental da *Secretaria de Medio Ambiente Del Municipio de Medellín* e o software ArcGIS. A referência base utilizada para o desenvolvimento do trabalho foi a metodologia de TUCCI (2000), na determinação das áreas impermeáveis e do volume de retenção na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.

### 4.1 GEODATABASE AMBIENTAL

A utilização de dados espaciais atualizados da área de estudo foi fundamental no desenvolvimento da dissertação. Uma das ferramentas principais empregadas nesse projeto foi a *Geodatabase Ambiental da Secretaria de Medio Ambiente Del Municipio de Medellín*, que é uma base de dados espacial em ArcGIS que contém a informação atualizada da Rede Hídrica do Município (Alcaldía de Medellín, 2012). Uma base de dados espacial em ArcGIS é um sistema de informação espacial, através de procedimentos computacionais que permitem e facilita a análise, gestão ou representação do espaço e dos fenômenos que nele ocorrem. Isto é, uma ferramenta baseada em programas de computador que separa a informação em diferentes camadas temáticas e armazena-as de modo independente (Esri, 2013).

Permite também, trabalhar de forma rápida e simples na construção de mapas para análise da terra e dos seus eventos, podendo relacionar diferentes dados a uma determinada localização geográfica, gerando novas informações sobre dados já conhecidos, e revelando relacionamentos e tendências não focalizadas aparentemente em planilhas ou pacotes estatísticos.

## 4.2 ArcGIS

O ArcGIS é o *software* para Sistemas de Informações Geográficas mais vendido e usado no mundo. Produzido pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) nos E.U.A, é um programa completo e extremamente poderoso na elaboração e manipulação de informação vetorial e matricial para o uso e gerenciamento de bases temáticas.

No ArcGIS estão inclusos o ArcReader, que permite ver os mapas criados com os outros produtos Arc; o ArcView, que possibilita a visualização de dados espaciais, criar mapas, e *performance* básica de análise espacial; o ArcEditor que inclui toda a funcionalidade do ArcView, isto é, ferramentas mais avançadas para manipulação de *shapefiles* e *geodatabases*; e o ArcInfo, a versão mais avançada do ArcGIS, que inclui potencialidades adicionadas para a manipulação de dados, edição e análise (Esri, 2013).

## 4.3 DADOS DA POPULAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO

De acordo com a Seção 3.1 (Tabela 3.1) a evolução da população do Município de Medellín tem sido registrada oficialmente desde o ano 1905 até o ano 2005, mas a informação da população por *Comunas* só foi determinada a partir do ano de 1993, ou seja, não se tem registros de população por bairros ou setores entre os anos 1905 e 1985, só um valor geral para a população de todo o Município.

Com o objetivo de conhecer a população na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso do ano 1905 até 1985 (Apêndice 3), foi estimada a percentagem da população da bacia com relação à população total no Município, do ano 1993 até 2030, (Apêndice 4). A população da bacia nesse período de estudo, ano a ano, foi aproximadamente 10% da população total do Município. Também foram gerados dois gráficos, que mostraram o comportamento da população do Município e da população da Bacia, entre 1993 e 2030. A razão entre os coeficientes desses dois gráficos foi de 8%, a qual foi considerada boa, devido a que é um valor próximo de 10% que representou a população da bacia (Apêndice 5).

Com esse critério, decidiu-se aplicar a taxa de 10% nos dados da população do Município de Medellín do ano 1905 até 1985, com o qual foi possível determinar a população da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.

#### 4.4 MALHA FLUVIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO

A Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso tem uma malha fluvial composta por córregos e riachos de tipo perene. Entre os principais se encontram o córrego *La Hueso*, córrego *Ana Diaz*, córrego *La Leonarda*, córrego *El Salado* e o córrego *La Pelahueso*. Nesse trabalho foram determinadas todas as áreas correspondentes às superfícies de todos os córregos da malha fluvial da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso; para isso foi utilizada toda a informação sobre as estruturas hidráulicas do setor centro-occidental do Município de Medellín (Alcaldia de Medellín, 2011), especificamente da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.

#### 4.5 RELAÇÃO IDF

A intensidade da precipitação depende da relação IDF da Estação Hidrometeorológica San Cristobal, que é a estação com influência na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, devido a que na própria bacia não se tem registros históricos de precipitação nem de vazão. As características da Estação são as seguintes:

- a) Nome da estação: San Cristobal
- b) Município: Medellín
- c) Departamento (Estado): Antioquia
- d) Entidade operadora: Empresas Públicas de Medellín (EPM)
- e) Código de Identificação: 2701046
- f) Coordenadas geográficas: 6°17' de latitude Norte  
75°38' de longitude Oeste
- g) Instalação: 08/1949
- h) Altitude: 1890m
- i) Tipo de Coleta de dados: Observação diária com registrador.

A relação Intensidade x Duração x Frequência (IDF) pode ser representada por meio das equações:

$$i = \frac{C}{(t + h)^m} \quad (4.1)$$

$$C = r(T_R)^P \quad (4.2)$$

Onde:  $i$ =intensidade da chuva máxima (mm/h);

$T_R$ = tempo de retorno (anos);

$t$  = tempo de duração da chuva (min);

$r, h, P, m$  = parâmetros determinados para a estação pluviográfica.

Os dados da relação Intensidade x Duração x Frequência (IDF), da Estação San Cristobal, para diferentes períodos de retorno, podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Relação IDF da Estação Hidrometeorológica San Cristobal

Tr	C	h	m
2	2593,60	25,00	0,95830
5	1307,80	10,00	0,79750
10	1180,00	6,00	0,75200
25	1249,00	4,00	0,73400
50	1308,10	3,00	0,72370
100	1326,90	2,00	0,70850

Fonte: Empresas Públicas de Medellín EPM (2012)

Embora a detenção distribuída das águas pluviais para o controle das enchentes urbanas seja um conceito associado à micro-reservatórios, na determinação do volume de detenção das águas pluviais foi utilizada a área total da Bacia Hidrográfica, 23,63 km<sup>2</sup>; a equação de chuva intensas da Estação San Cristobal foi calculada para um período de retorno de 10 anos.

$$i = \frac{1180}{(t + 6)^{0,752}} \quad (4.3)$$

Onde:  $i, T_R, t, r, h, P, m$ = definidos anteriormente.

## 4.6 METODO DE DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE DETENÇÃO DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS PLUVIAIS

### 4.6.1 Determinação das densidades demográficas na bacia hidrográfica do Córrego La Hueso

A densidade demográfica é um dos fatores determinantes no processo da urbanização de uma região, a qual por sua vez traz profundas modificações no uso do solo, causando marcas permanentes nas respostas hidrológicas das áreas urbanizadas, e é uma ferramenta determinante no planejamento para cada subdivisão da cidade, como no caso das bacias hidrográficas.

A densidade demográfica é uma medida expressa pela relação entre a população e a superfície do território, e geralmente sua unidade é habitantes por  $\text{km}^2$  ou por hectare (ha).

Para a determinação da densidade demográfica na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso desde 1905 até 2030 foram utilizados os dados da população na bacia no mesmo período e a informação referente à área de cada comuna que corresponde à Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso; a densidade demográfica foi calculada como a razão da população por a área.

### 4.6.2 Evolução da impermeabilização dos solos na bacia hidrográfica do córrego La Hueso

A evolução da impermeabilização dos solos da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, está direta e intimamente vinculada ao processo de urbanização ocorrido no Município de Medellín. A bacia analisada no estudo é uma região altamente urbanizada, da qual, no projeto de pesquisa, não se tem informação de imagens digitais de satélite. Conceitualmente, para conhecer a evolução da impermeabilização dos solos da Bacia, foi dado ênfase ao estudo feito por TUCCI (2000), no qual é analisado o impacto das áreas impermeáveis no gerenciamento do espaço urbano das bacias hidrográficas, por meio do coeficiente de escoamento. A determinação das taxas de impermeabilização dos solos da bacia foi feita com a aplicação da Equação (2.12), a qual está em função da densidade demográfica na bacia (Seção 4.2).

A metodologia da densidade demográfica, estudada por TUCCI (2000), não considera como áreas impermeáveis dos solos, a somatória das superfícies



das lâminas de água, de toda a malha fluvial dos córregos e rios de uma bacia hidrográfica. Nesse trabalho foram somadas ao resultado gerado pela metodologia da densidade demográfica, Equação (2.12), todas as áreas impermeáveis correspondentes às superfícies de todos os córregos da malha fluvial da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.

#### 4.6.3 Determinação do volume de retenção distribuída na bacia hidrográfica do córrego La Hueso

A determinação do volume de retenção distribuída das águas pluviais na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso foi feita com a aplicação da Equação (2.30), que é uma expressão que depende da vazão de pico de pré-desenvolvimento, da vazão de pico de pós-desenvolvimento e do tempo de duração da chuva.

Entendem-se como condições de pré-desenvolvimento as condições reinantes na bacia antes das alterações antropogênicas, remetendo ao ano de 1905.

As vazões de pico de pré-desenvolvimento e pós-desenvolvimento são expressões que estão em função do coeficiente de escoamento superficial, da intensidade da chuva e da área total da bacia hidrográfica.

O coeficiente de escoamento superficial é função de uma série de fatores, entre os quais o tipo de solo, a ocupação da bacia, a umidade antecedente, a intensidade da chuva e entre outros. A adoção, portanto, de um valor constante para o coeficiente é uma hipótese pouco realista e deve ser feita com cautela. Geralmente o coeficiente de escoamento superficial é determinado em função da ocupação do solo.

Os valores dos coeficientes de escoamento superficial para as condições de pré-desenvolvimento e pós-desenvolvimento foram determinados em função da taxa de impermeabilização dos solos da bacia,  $C \approx AI$ , nos anos 1905 e 2030, respectivamente.

O conceito de retenção distribuída das águas pluviais pode ser aplicado usando diversos dispositivos como valas de infiltração, telhados armazenadores, trincheiras de infiltração, reservatórios de retenção, pavimentos permeáveis e bacias de infiltração entre outros, como mencionado na Seção 2.3.1.1. Cada um desses dispositivos apresenta características específicas de projeto, com

vantagens e desvantagens, que de acordo com o objetivo do projeto permitem a sua seleção.

No presente estudo foi escolhido o reservatório individual como dispositivo de detenção de águas pluviais, devido que o solo da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso tem um coeficiente de permeabilidade baixo, como mostrado na Seção 3.2.6, o que limita a possibilidade de implementar técnicas que sejam fortes na infiltração das águas pluviais.

A capacidade dos reservatórios de detenção das águas pluviais, na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, para a impermeabilização máxima dos solos, no ano de 2030, é calculada pela Expressão (4.4):

$$V = V_D \times A_C \quad (4.4)$$

Onde:  $V$  = capacidade do reservatório de detenção das águas pluviais ( $m^3$ );

$V_D$  = volume unitário de reservação das águas pluviais ( $m^3/m^2$ );

$A_C$  = área de coleta das águas pluviais ( $m^2$ ).

#### 4.6.4 Tempo de concentração na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

Como o valor da intensidade da chuva depende do tempo de concentração ( $t_c$ ), se determina o valor da vazão máxima com o Método Racional, isto é, o tempo de duração da chuva é igual ao tempo de concentração da bacia hidrográfica.

Procederam-se cálculos para o cenário de pré-desenvolvimento, com inúmeras fórmulas do tempo de concentração para a Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, entretanto a que mais se ajustou à Bacia foi a Equação (2.20), que foi obtida para bacias hidrográficas pequenas com áreas de até 19  $km^2$ .

Para o cenário pós-desenvolvimento foi importante obter uma expressão para o tempo de concentração da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso em função da área impermeável, que refletisse as condições da urbanização geradas pelo aumento da densidade demográfica ao longo do tempo. Esse tempo de concentração foi obtido com a Equação (2.23), que mostra o efeito da taxa de impermeabilização dos solos sobre o tempo de concentração da bacia.

## 5 RESULTADOS OBTIDOS

No presente Capítulo são mostrados os resultados obtidos com a aplicação do método descrito no Capítulo 4. Primeiramente, são expostas as considerações adotadas nos diferentes procedimentos utilizados na obtenção da densidade demográfica e das áreas impermeáveis da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, assim como os fatores determinantes na seleção do tipo de técnica compensatória para o controle das enchentes na bacia. Os resultados da densidade demográfica e evolução das áreas permeáveis e impermeáveis na bacia são apresentados na sequência, e conseqüentemente o volume unitário de retenção das águas pluviais e as capacidades desse reservatório para o armazenamento temporário das águas pluviais.

### 5.1 DENSIDADE DEMOGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO

A Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso encontra-se localizada na região Centro-Oeste do Município de Medellín, sobre as *comunas* Laureles-Estadio, La América, San Javier e os *Corregimientos* de San Cristóbal e Altavista, como mostrado na Figura 5.1.

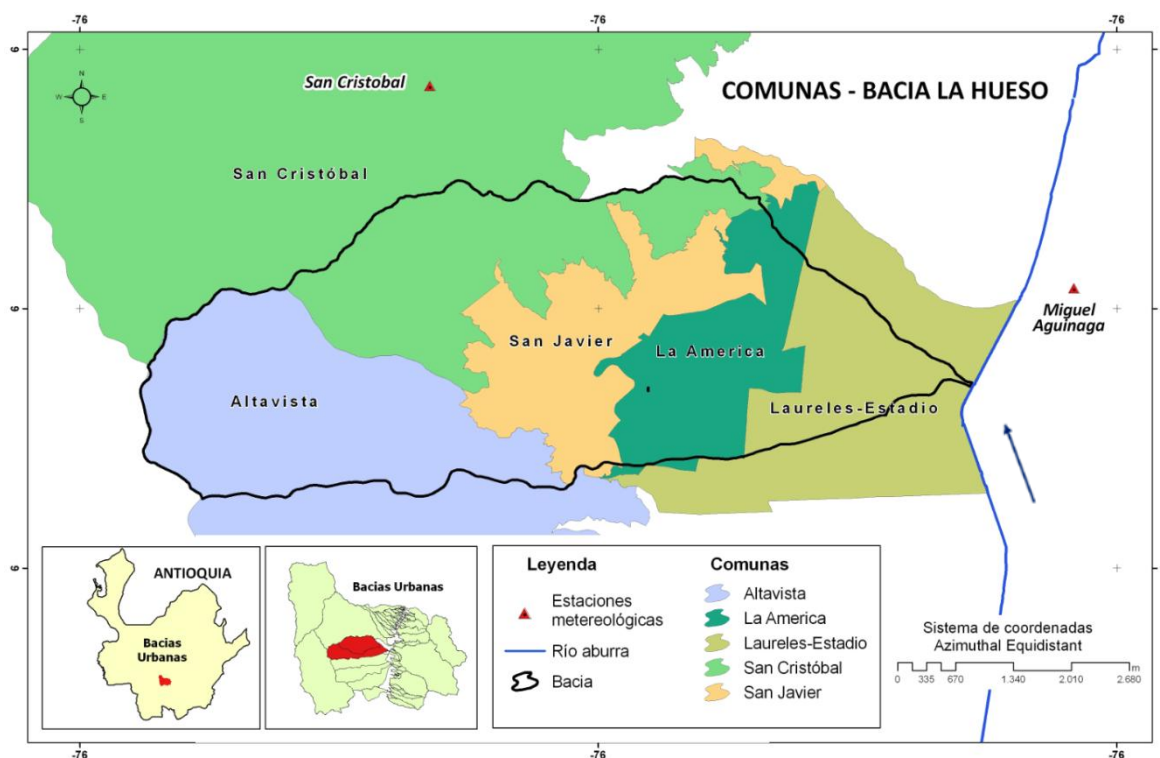


Figura 5.1 - Comunas correspondentes à Bacia do Córrego La Hueso

As áreas correspondentes à bacia hidrográfica de cada uma das comunas podem ser observadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Áreas das comunas correspondentes à Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

<b>Comuna ou Corregimiento</b>	<b>Área Total (ha)</b>	<b>Área correspondente na Bacia Hidrográfica (ha)</b>
Laureles-Estadio	740	250
La América	441	362
San Javier	562	456
San Cristobal	5411	580
Altavista	3164	716
<b>Total</b>	<b>10319</b>	<b>2363</b>

Para a determinação da densidade demográfica na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, foi calculada a relação entre as áreas das comunas correspondentes à bacia hidrográfica, Tabela 5.1, e os dados de população para as respectivas áreas (Apêndice 2). Os resultados estão expressos na Tabela 5.2.

A Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso tem registrado um crescimento na população, tanto quanto o Município de Medellín, que é explicado como o fruto de um crescimento vegetativo ou natural (nascimentos menos óbitos) e do fenômeno de migrações. Para os cálculos da densidade demográfica nesse estudo, o valor da área da bacia hidrográfica se manteve fixo, portanto, a densidade demográfica é diretamente proporcional ao número de habitantes.

Tabela 5.2 - Densidades demográficas da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso (A=2363 ha)

<b>ANO</b>	<b>DENSIDADE DEMOGRÁFICA (hab/ha)</b>
1905	2,53
1912	2,98
1918	3,35
1928	5,08
1938	7,12
1951	15,15
1964	32,70
1973	45,57
1985	62,11
1993	83,22
2005	96,10
2006	97,14
2007	98,21
2008	99,23
2009	100,27
2010	101,31
2011	102,19
2012	103,04
2013	103,83
2014	104,58
2015	105,29
2016	105,87
2017	106,53
2018	107,28
2019	108,12
2020	109,05
2021	109,47
2022	109,96
2023	110,54
2024	111,19
2025	111,92
2026	112,19
2027	112,55
2028	112,98
2029	113,49
2030	114,09

Pode-se notar na Tabela 5.2, que Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso sofreu um incremento da densidade demográfica aproximadamente de 0,9% anual no período de estudo, e que tem uma tendência clara a continuar crescendo.

## 5.2 EVOLUÇÃO DA IMPERMEABILIZAÇÃO DOS SOLOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO

Para conhecer a evolução da impermeabilização dos solos da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, desde 1905 até 2030, foram calculadas as taxas de impermeabilização dos solos com base nas densidades demográficas da bacia (Tabela 5.2), utilizando a Equação (2.12). Para todas as taxas calculadas foi somado meio ponto percentual (0,5%) que foi a taxa correspondente das áreas impermeáveis das superfícies de todos os córregos da malha fluvial da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, calculada com a informação sobre as estruturas hidráulicas do setor centro-ocidental do Município de Medellín (Alcaldia de Medellín, 2011). Os resultados estão indicados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Evolução das áreas impermeáveis da Bacia Hidrográfica urbana do Córrego La Hueso pela metodologia da Densidade Demográfica (A=2363 ha).

<b>ANO</b>	<b>AI (%)</b>	<b>AI total (%)</b>	<b>A<sub>imp</sub> (ha)</b>	<b>A<sub>perm</sub> (ha)</b>
1905	1,24	1,74	41,07	2322,81
1912	1,46	1,96	46,32	2317,56
1918	1,64	2,14	50,52	2313,35
1928	2,48	2,98	70,52	2293,35
1938	3,48	3,98	94,10	2269,77
1951	7,41	7,91	186,97	2176,90
1964	15,99	16,49	389,76	1974,11
1973	22,28	22,78	538,60	1825,28
1985	30,37	30,87	729,71	1634,16
1993	40,69	41,19	973,78	1390,10
2005	46,99	47,49	1122,65	1241,22
2006	47,50	48,00	1134,75	1229,13
2007	48,03	48,53	1147,08	1216,80
2008	48,52	49,02	1158,89	1204,99
2009	49,03	49,53	1170,90	1192,98
2010	49,54	50,04	1182,84	1181,03
2011	49,97	50,47	1193,05	1170,82
2012	50,39	50,89	1202,90	1160,97
2.013	50,77	51,27	1212,03	1151,85
2.014	51,14	51,64	1220,75	1143,13
2.015	51,49	51,99	1228,91	1134,96
2.016	51,77	52,27	1235,61	1128,27
2.017	52,09	52,59	1243,28	1120,60
2.018	52,46	52,96	1251,94	1111,93
2.019	52,87	53,37	1261,61	1102,27
2.020	53,32	53,82	1272,31	1091,56
2.021	53,53	54,03	1277,20	1086,68
2.022	53,77	54,27	1282,94	1080,93
2.023	54,05	54,55	1289,56	1074,31
2.024	54,37	54,87	1297,09	1066,79
2.025	54,73	55,23	1305,53	1058,35
2.026	54,86	55,36	1308,71	1055,16
2.027	55,04	55,54	1312,79	1051,08
2.028	55,25	55,75	1317,79	1046,09
2.029	55,50	56,00	1323,72	1040,15
2.030	55,79	56,29	1330,62	1033,26

Um aumento de 1,52% anual tendo como base o valor bruto inicial, em superfícies impermeáveis foi observado durante o período de estudo de 125 anos, de 1905 até 2030, na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, o que significa que a bacia sofreu um aumento total nas áreas impermeáveis de 1289,6 ha.

De acordo com a Tabela 3.5 (Seção 3.2.7), do total da área da Bacia, 51,76% do solo está classificado como solo rural e de proteção, e segundo o POT, não poderá ser urbanizado, o qual gera uma condição limitante para o crescimento da cidade nesse setor. Por este motivo a área que pode ser urbanizada é unicamente 48,24% do total da bacia, equivalente a 1139 ha. Além disso, outro fator determinante que limita o crescimento da cidade nessa região é a topografia, que no setor rural apresenta inclinações da ordem de 60%.

Como observado na Tabela 5.3, para o ano 2030, a taxa da impermeabilização dos solos da bacia atinge o valor de 56,3%, valor que claramente significa que no ano 2030 a bacia terá mais da metade da sua área total impermeabilizada, 1330,62 ha, mas pela regulamentação do POT, esse valor já ultrapassa os limites estabelecidos para o uso dos solos na bacia, portanto, pode-se dizer que no ano 2030, o valor da taxa de impermeabilização dos solos é muito próximo ao valor máximo, como se tinha considerado inicialmente nessa seção.

### 5.3 VOLUME DE DETENÇÃO DISTRIBUÍDA DAS ÁGUAS PLUVIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO LA HUESO

Para o equacionamento de qual o volume de retenção das águas pluviais na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, com área de drenagem  $A = 23,63 \text{ km}^2$ , com a finalidade de minimizar suas enchentes, se faz uso da Equação (2.30), que é detalhada como foi mostrado na Expressão (2.32):

$$\frac{V}{A} = \left[ 0,278 * C * \frac{a}{(t + b)^d} - Q_a \right] * t * 60 \quad (5.1) \equiv (2.32)$$

Nessa expressão,  $Q_a$  é a vazão correspondente a condição natural, isto é, a vazão da condição de pré-desenvolvimento da bacia hidrográfica.



$Q_a$  pode ser detalhada como na Equação (5.2)

$$Q_a = 0,278 \times C \times I = 0,278 \times C \times \frac{a}{(t + b)^d} \quad (5.2)$$

Onde  $t$  = tempo de duração da chuva = tempo de concentração da bacia ( $t_c$ ).

Substituindo os valores  $L = 8,56$  km e  $I = 118,8$  m/km na Equação (2.20), devida a Vem Te Chow, obtém-se o tempo de concentração da bacia:

$$t_c = 52,64 * \left( \frac{8,56}{\sqrt{118,8}} \right)^{0,64} = 45,09 \text{ min.}$$

Substituindo o tempo de concentração na expressão de chuvas intensas da Estação San Cristobal, Equação (4.3), se obtém a intensidade máxima da chuva:

$$i = \frac{1180}{(45,09 + 6)^{0,752}} = 61,26 \text{ mm/h}$$

Portanto, para as condições de pré-desenvolvimento da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, substituindo na Equação (5.1), obtém-se a vazão de pré-desenvolvimento da bacia:

$$Q_a = 0,278 \times 0,017 \times 61,26 = 0,29 \frac{m^3}{s \times km^2}$$

Para condições pós - desenvolvimento da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, e fazendo as devidas substituições na Equação (2.23), devida a Schaake, tem-se:

$$t_c = 0,0828 \times \frac{8,56^{0,24}}{0,1188^{0,16} \times 0,563^{0,26}} = 13,6 \text{ min}$$

E a intensidade da chuva para  $T_r = 10$  anos:

$$i = \frac{1180}{(13,6 + 6)^{0,752}} = 126,02 \text{ mm/h}$$

De acordo com os valores assumidos para os coeficientes de escoamento superficial (Seção 4.4) e substituindo na Equação (5.1), obtém-se o volume de retenção distribuída das águas pluviais, na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso:

$$\frac{V}{A} = [(0,278 * 0,563 * 126,02) - (0,278 * 0,017 * 61,26)] * 13,6 * 60$$

$$\frac{V}{A} = 15749,02 \frac{m^3}{km^2} = 157,4902 \frac{m^3}{ha}$$

A capacidade dos reservatórios de armazenamento temporário das águas pluviais, na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, pode ser calculada substituindo o valor do volume de retenção das águas pluviais determinado no item anterior:

$$V = 15749,02 \frac{m^3}{km^2} \times A_c \quad (5.3)$$

Com a área de coleta unitária  $A_c$  e fazendo as conversões de unidades, obtém-se o volume para retenção das águas pluviais na bacia:

$$V = 15,75 \frac{mm}{m^2} \approx 16 \frac{mm}{m^2}$$

Assim, para cada  $m^2$  de coberturas impermeáveis nos imóveis da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, é necessário a retenção de um volume de 16 litros de água pluvial. Para várias áreas de coleta das águas pluviais, estão indicadas na Tabela 5.4, as capacidades correspondentes dos reservatórios de retenção distribuída.

Tabela 5.4 -Capacidade dos reservatórios de retenção distribuída das águas pluviais da  
Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso ( $A=23,63 \text{ km}^2$ )

Área de Coleta $A_c \text{ (m}^2\text{)}$	Capacidade dos Reservatórios das Águas Pluviais $V \text{ (m}^3\text{)}$
10	0,16
100	1,59
1000	15,86
10000 (= 1 ha)	158,57
100000	1585,66
1000000 (= 1km <sup>2</sup> )	15856,57

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A realização deste Trabalho, tanto no que se refere à pesquisa bibliográfica sobre o tema e à análise dos dados coletados, permite que muitas idéias e opiniões sejam consolidadas, e também que se tirem alguns ensinamentos das tarefas realizadas.

A principal causa das enchentes na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, localizada no Município de Medellín – Colômbia, deve-se à ocupação desordenada do solo e a sistemas de drenagem urbana que transferem o problema para jusante, sem qualquer preocupação com a detenção e/ou retenção dos volumes escoados. Para o controle desse problema, foi verificada a viabilidade da implantação de sistemas de detenção distribuída das águas pluviais na referida Bacia.

Da obtenção das áreas impermeáveis na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, pela metodologia da densidade demográfica, apresentada por TUCCI no ano 2000, concluiu-se que o aumento da impermeabilização dos solos aconteceu em uma média anual de 1,52%, no período compreendido entre 1905 e 2030, o que significa que a bacia sofreu um aumento total nas áreas impermeáveis, neste mesmo período, de 1289,6ha em relação a sua condição de pré-desenvolvimento.

Pela variação das vazões de pico de pré e pós-desenvolvimento, em função das taxas de impermeabilização dos solos e, conseqüentemente, dos tempos de concentração da bacia hidrográfica, concluiu-se que o volume de detenção necessário à minimização das enchentes da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, por unidade de área, é:  $\frac{V}{A} = 157,4902 \frac{m^3}{ha} = 15,75 \frac{mm}{m^2} \approx 16 \frac{mm}{m^2}$ .

O dispositivo de controle distribuído das águas pluviais recomendado foi o micro-reservatório de detenção, devido à sua aplicação, que tem a vantagem de uma implementação mais simples, demandando menos tempo de instalação e que pode ser aplicado em pequenos espaços livres, como jardins ou quintais, ou ainda, em espaços ou logradouros públicos, compensando também a impermeabilização imposta pelo sistema viário.

Essas estruturas associadas ao sistema de drenagem convencional podem proporcionar redução de vazões e volumes escoados superficialmente, conseqüentemente, reduzindo as enchentes urbanas na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.

Na escolha do dispositivo para detenção distribuída das águas pluviais a ser instalado na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, foram determinantes os coeficientes de permeabilidade dos solos da bacia, determinados por Donizeti A. Giusti, em 2012, para as duas principais litologias da bacia hidrográfica: Stock de *Altavista* e *Aluviones Recientes*, e pela UNAL em 2009 (Tabela 3.4 e Figura 3.5).

Devido aos comportamentos idênticos tanto nos aspectos de urbanização como nas impermeabilizações dos solos, a Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, com área de drenagem  $A=23,63 \text{ km}^2$ , onde foram feitas todas as avaliações quantitativas, e a região centro-oeste da cidade de Medellín, é possível extrapolar os valores unitários de detenção distribuída (Tabela 5.4) a serem adotados no dimensionamento dos reservatórios de detenção das águas pluviais, visando à minimização das enchentes urbanas em toda a área de drenagem de Medellín ( $A=380 \text{ km}^2$ ).

As cidades precisam, urgentemente, repensar seu crescimento e sua infraestrutura, em especial no que se refere aos sistemas de drenagem urbana inovadores. A drenagem deve ser planejada adotando-se medidas de controle na fonte, de modo a não haver transferência espacial de problemas, evitando um agravamento dos impactos gerados pela urbanização intensiva.

Também é muito importante o monitoramento da precipitação na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, devido à alta frequência dos transbordamentos dos seus córregos na estação chuvosa. Registros históricos de precipitação e vazão na Bacia ajudaram no gerenciamento da drenagem urbana nesse setor.

A necessidade de mais trabalhos é evidente, uma vez que não é só uma dissertação de mestrado que vai esgotar as variadas possibilidades de investigação no que se refere as estruturas desta natureza, principalmente em um País como a Colômbia, onde algumas cidades, como Medellín, estão começando a despertar para esta nova forma de lidar com a Hidrologia Urbana, e que é muito carente em trabalhos desta natureza.

O Sensoriamento Remoto é hoje um recurso essencial na detecção e no controle de situações desfavoráveis ao meio ambiente. Por meio de imagens digitais de satélite, é possível fazer um levantamento preciso da situação, ocupação e transformação do meio ambiente. Nesse contexto, as inovações tecnológicas e os avanços científicos surgidos, para a espacialização das geoinformações, levantamento do uso e ocupação do solo são de extrema importância para um melhor gerenciamento, contribuindo positivamente aos estudos ambientais.

No que se refere às aplicações práticas de micro-reservatórios para retenção na fonte, se recomenda fortemente a sua manutenção e operação, sendo esses fatores imprescindíveis na aplicação das estruturas de controle das enchentes urbanas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRA, S. G. **Estudo Experimental de Microreservatórios para o Controle do escoamento superficial**. 122f, Dissertação (Mestre em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ALCALDÍA DE MEDELLÍN. Departamento Administrativo de Planeación. Documento Técnico de Soporte POT (acuerdo 46/2006). Primera parte: Generalidades. 2006

ALCALDÍA DE MEDELLÍN. Secretaria del Medio Ambiente. **Segundo Levantamiento de Cuencas Integradas**. Medellín, Abril de 2011.

ALCALDIA DE MEDELLÍN. Actualización de la red hídrica. Geodatabase Ambiental. 2012.

ALCALDIA DE MEDELLÍN. **Datos generales de La ciudad**. Disponível em: <http://www.medellin.gov.co/irj/portal/visitantes?NavigationTarget=navurl://ff556ed54f8f4fb94e0c28e0bb15d9c8> Acesso em: janeiro de 2013.

ALCALDIA DE MEDELLÍN. **Mapas protocolizados**. Disponível em: <http://poseidon.medellin.gov.co/MapasProtocolizados/MapasProtocolizadosII.htm> Acesso em: 12 de julho de 2012.

ALVAREZ, C.; SANCHEZ, J. Estudos hidrológicos da urbanização da bacia do Arroio Dilúvio: relatório final. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, 196 p. Porto Alegre, 1979

ARISTIZABAL, E.; GOMEZ, J. Inventario de emergências y desastres em El Valle de Aburrá, originados por fenômenos naturais y antrópicos em El período 1880 – 2007. Gestión y ambiente, v. 10, n. 2, 2007.

ARISTIZABAL, E; YOKOTA S. Evolución geomorfológica del Valle de Aburrá y sus implicaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. **Boletín de Ciencias de la Tierra**, n. 24, nov. /2008, p. 5-17, Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia.

BATISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2ª edição. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318p.

CAMPANA, N.; TUCCI, C.E.M; Estimativa de área impermeável de macro-bacias urbanas. **RBE- Caderno de recursos hídricos**, v. 12, n.2, dez/1994.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Hidrologia aplicada**. Santa Fé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A. 1994.

CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Medidas de controle do escoamento urbano. Controle do escoamento em lotes urbanos com retenção. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2000. p. 363-382.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Hidrologia urbana**. Primeiro relatório parcial. Escola Politécnica da USP. São Paulo – SP, 1978

DANE- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. **Censo 2005**. Disponível em: <http://www.dane.gov.co>. Acesso em: junho de 2012

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN- DNP. Documento regional, Antioquia. **Agenda Interna para la Productividad y la Competitividad**. República de Colombia. Bogotá, Junio 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. 2. Ed. Rio de Janeiro, 2005.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN– EPM. Relação IDF da Estação Meteorológica San Cristobal. [Mensagem Pessoal]. Mensagem recebida por: [suki.bustamante@gmail.com](mailto:suki.bustamante@gmail.com), em 29/08/2012.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **What is GIS?**. Disponível em: <http://www.esri.com>. Acesso em: Janeiro de 2013.



FARIA, R.; PEDROSA, A. **Impactos da urbanização na degradação do solo urbano e sua relação com o incremento de inundações urbanas em Santa Maria da Feira**. International Symposium in Land Degradation and Desertification. Uberlândia, 2005.

FENDRICH, R. **Coleta, armazenamento, utilização e infiltração das águas pluviais na drenagem urbana**. 499p. Tese de Doutorado em Geologia Ambiental – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal de Paraná - UFPR, Curitiba, 499p.,2002.

FENDRICH, R.; **Canais de drenagem em pequenas bacias hidrográficas**. Curitiba - PR, 121p., 2008.

GIUSTI, Donizeti Antonio. **Comunicação Verbal a autora**. 2012.

HERMELIN, M.; MEJIA, L. J.; LOPEZ, J. La importancia de la instalación de redes meteorológicas densas en las ciudades localizadas en montañas del trópico húmedo. Meteorología Colombiana, n. 5, p. 115-122. 2002

INSTITUTO MI RIO; MUNICIPIO DE MEDELLÍN; PNUD. **Levantamiento integrado de cuencas hidrográficas del Municipio de Medellín**.1995

JUSTINO, E. A.; MARTINS, H.; PAIVA, C. R. Análise do efeito da impermeabilização dos solos urbanos na drenagem de água pluvial do município de Uberlândia-mg. **Espaço em Revista**. Goiânia, v. 13 n. 2, p. 16 – 38, jul./dez. 2011

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Instituto de Investigación e información geo-científica, minero-ambiental y nuclear- INGEOMINAS. Informe Técnico: **Mapa geológico del departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales**. República de Colombia. 2001.

MONTOYA, J.; PATIÑO, J. E. **Estudio Hidrometeorológico y Geomorfológico de Diez Quebradas del Valle de Aburrá**.243f, Dissertação (Maestría en Ciencias de la Tierra) – Sector de Geología, Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT), Medellín, 2001.

MOPU Tecnología Carreteras. **Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos em pequenas cuencas naturales**. Textos de La Dirección General de Carreteras, n 12,124 p. España, 1987

O'LOUGHLIN, G.; BEECHAM, S.; LEES, S.; ROSE, L.; NICHOLAS, D. Utilisation de systèmes ponctuels de stockage des eaux pluviales dans Sydney. **Water Science and Technology**. v. 32, n. 1, p. 169-175. 1995

PILAR, A. E.; BIAIN, R. H. Estudio de viabilidad técnica de la implantación de retardadores de escurrimiento pluvial en lotes urbanos. In: TUCCI, C.E.M.; GOLDENFUM, J.A.; DEPETTRIS, C.A.; PILAR J.V. **Hidrologia urbana na bacia do prata**. Porto Alegre: ABRH: IPH/UFRGS. 2000. p. 99-107.

PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL – POT. **Usos Generales del Suelo**. Medellín, 2006. Disponível em:  
<http://www.medellin.gov.co/irj/portal/ciudadanos?NavigationTarget=navurl://2eecff51ccb3b791d1e1f92081d3cc09>. Acesso em: 9 de julho de 2012.

SÁNCHEZ, L. M.; Migración forzada y urbanización en Colombia. Perspectiva histórica y aproximaciones teóricas. **Seminario internacional “Procesos Urbanos Informales”**. Bogotá, 2007.

SCHILLING, Wolfgang. Cisterns against storms. **Urban drainage systems**. Computational Mechanics Centre of the Southampton University. Southampton England, Chapter 4: p.49-60, 1982.

SCHUELER, T. **Controlling Urban Runoff**. Washington Metropolitan Water Resources Planning Board. P. 210. 1987.

SCHNITTER, P.; Construcción fragmentaria, característica del crecimiento metropolitano de la ciudad de Medellín, Colombia. Lectura cartográfica de tres momentos significativos. **Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**. Barcelona. v. 9, n. 194, 1 de agosto de 2005.

SCHNITTER, P.; La ocupación del territorio en el proceso de urbanización del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Colombia. **Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales**. Barcelona. v. 10, n. 218, 1 de agosto de 2006.

SILVA, D. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. 131f, Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVEIRA, A. **Contribution à l'étude hydrologique d'un bassin semi-urbanisé dans le Brésil subtropical, bassin de l'Arroio Dilúvio à Porto Alegre.** 240f, Thèse, Académie de Montpellier, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, 1996.

SILVEIRA, A. **Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XIII, Belo Horizonte, Anais ABRH CD Rom. p. 1-13, 1999.

SILVEIRA, A. L. L. **Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais.** RBRH- Revista Brasileira de recursos Hídricos. v. 10, n.1, p. 5-23, jan./mar.2005.

TASSI, R. **Efeito dos microrreservatórios de lote sobre a macrodrenagem urbana.** 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS. Porto Alegre, 2002

TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B.; SILVEIRA, A. **Avaliação do impacto da urbanização nas cheias urbanas.** Revista Brasileira de Engenharia, v.7, n.1, p.77-101, jun, 1989.

TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A.; CRUZ, M. Banco de eventos de cheias de bacias urbanas brasileiras. In: TUCCI, C.E.M.; MARQUES, D. **Avaliação e controle da drenagem urbana.** Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000. p. 25-50.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima das bacias urbanas. Porto Alegre: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.1, p.61-68, jan/mar, 2000.

TUCCI, C.E.M.- Água no meio urbano, In: **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação.**, Capítulo 12 p. 399-432. São Paulo, 2006.

TSUCHIYA, Akihiko. Evaluation of on-site stormwater detention methods in urbanized area. In: P. R. Helliwell (Editor). **Urban storm drainage.** London England: Centech Press, p. 470-478, 1978.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - UNAL. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil y Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. **Zonificación de la amenaza por movimientos en masa detonados por lluvias en el valle de aburra.** Libro II, Capítulo I. Medellín, Julio de 2009. Informe Final.

UNFPA - Fondo de Población de las Naciones Unidas – Universidad Externado de Colombia. Centro de investigación sobre dinámica social. **Ciudad, Espacio y Población: El proceso de urbanización en Colombia.** 2007.

UNFPA- Fondo de Población de las Naciones Unidas – ONU América Latina y el Caribe. **Estado de Población Mundial 2011: 7 mil millones de personas, su mundo, sus posibilidades.** 2011.

UPPER PARRAMATTA RIVER CATCHMENT TRUST - UPRCT. **On-Site Stormwater Detention Handbook.** Parramatta, 1994.

WOODS-BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R.; SHAFFER, P.; **The SuDS Manual.** Londres: Ciria, 2007.

## 8 APÊNDICES

APÊNDICE 1– Projeção da população de Medellín, por Comunas e Corregimientos .....	112
APÊNDICE 2– Projeção da população na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, discretizada por Comunas e Corregimientos.....	115
APÊNDICE – 3 Estimativa da população 1905-1985 da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, aplicando uma taxa de 10%.....	117
APÊNDICE – 4 Projeção da população 1993-2030 do Município de Medellín e da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso. ....	118
APÊNDICE – 5 Análise gráfica da projeção da população (1993-2030) do Município de Medellín e da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso .....	119

**APÊNDICE 1– Projeção da população de Medellín, por Comunas e Corregimientos**  
**Período 1993-2012**

<b>Comuna ou Corregimiento</b>	<b>População</b>								
<b>Ano</b>	<b>1993</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
Popular	99238	122067	123120	124141	125110	126024	126887	127696	128447
Santa Cruz	92840	103212	104168	105127	106070	106989	107869	108703	109481
Manrique	121113	148762	150128	151449	152715	153912	155049	156112	157106
Aranjuez	132670	156845	157575	158265	158911	159511	160068	160581	161057
Castilla	125391	142867	143603	144328	145049	145764	146471	147159	147832
Doce de Octubre	156230	185673	186638	187574	188475	189335	190155	190940	191677
Robledo	110073	154097	156062	157996	159895	161750	163559	165311	167003
Villa Hermosa	103034	129569	130606	131594	132526	133407	134235	135003	135713
Buenos Aires	116341	132509	133069	133599	134101	134574	135005	135422	135804
La Candelaria	68313	84266	84431	84589	84736	84872	85000	85117	85221
Laureles-Estadio	96377	118081	118665	119209	119715	120180	120607	120996	121358
La América	79711	91345	91952	92541	93108	93648	94165	94649	95104
San Javier	116566	127937	129183	130431	131647	132799	133918	134933	135885
El Poblado	63315	110671	112786	114850	116864	118811	120695	122489	124210
Guayabal	67567	86326	87388	88409	89382	90295	91147	91937	92661
Belén	163124	187824	189096	190287	191401	192418	193343	194174	194921
Palmitas	3067	3240	3408	3558	3914	4137	4370	4729	5086
San Cristobal	17387	25815	32418	39692	46512	53354	60025	63774	67603
Altavista	10944	26192	26461	26741	27020	27857	28973	30458	31948
San Antonio	45391	66484	66982	69220	71701	74243	77007	82901	88998
Santa Elena	4799	10712	11264	11644	12526	13456	14501	15198	15896
<b>Total Medellín</b>	1793491	2214494	2239003	2265244	2291378	2317336	2343049	2368282	2393011

## Período 2013-2021

<b>Comuna ou Corregimiento</b>	<b>População</b>								
<b>Ano</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>
Popular	129144	129.781	130.369	130960	131617	132343	133139	134006	134298
Santa Cruz	110202	110858	111452	111930	112485	113120	113837	114638	114861
Manrique	158028	158877	159658	160308	161085	161991	163031	164209	164504
Aranjuez	161491	161885	162252	162919	163712	164634	165688	166879	167228
Castilla	148490	149133	149751	150229	150893	151747	152796	154044	154261
Doce de Octubre	192381	193039	193657	194351	195238	196324	197612	199109	199452
Robledo	168624	170178	171660	172375	173253	174299	175518	176916	177325
Villa Hermosa	136375	136976	137531	138152	138856	139644	140518	141481	141803
Buenos Aires	136154	136477	136774	137322	137983	138759	139650	140661	140968
La Candelaria	85323	85418	85505	85836	86258	86775	87388	88100	88286
Laureles-Estadio	121678	121969	122243	122730	123361	124138	125065	126145	126457
La América	95523	95916	96278	96614	97075	97664	98381	99229	99447
San Javier	136689	137422	138063	138775	139525	140313	141140	142007	142401
El Poblado	125841	127386	128839	129417	130145	131025	132063	133262	133688
Guayabal	93326	93928	94470	94868	95354	95927	96590	97343	97592
Belén	195588	196175	196694	197464	198418	199558	200888	202411	202843
Palmitas	5476	5887	6324	6588	6867	7159	7468	7792	8095
San Cristobal	71518	75493	79458	81429	83481	85620	87848	90171	92624
Altavista	33466	34977	36463	37087	37748	38446	39185	39966	40552
San Antonio	95392	102023	108856	112871	117085	121508	126152	131029	135368
Santa Elena	16616	17325	18025	18304	18601	18917	19253	19609	19909
<b>Total Medellín</b>	2417325	2441123	2464322	2481781	2500931	2521818	2544493	2569007	2583109

## Período 2021-2030

<b>Comuna ou Corregimiento</b>	<b>População</b>								
<b>Ano</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>
Popular	134654	135076	135566	136125	136131	136206	136354	136575	136872
Santa Cruz	115158	115529	115978	116505	116494	116550	116675	116870	117137
Manrique	164933	165501	166210	167064	167051	167159	167393	167755	168250
Aranjuez	167701	168302	169034	169902	169928	170073	170340	170730	171247
Castilla	154655	155230	155990	156942	156899	157027	157329	157810	158476
Doce de Octubre	199978	200692	201600	202708	202722	202933	203346	203969	204811
Robledo	177874	178566	179406	180395	180487	180707	181059	181544	182165
Villa Hermosa	142199	142671	143221	143851	143901	144017	144201	144452	144773
Buenos Aires	141370	141869	142465	143160	143220	143377	143633	143987	144443
La Candelaria	88560	88925	89383	89938	90013	90172	90417	90748	91170
La América	99772	100204	100747	101400	101558	101821	102190	102667	103255
San Javier	142830	143295	143796	144335	144456	144618	144820	145065	145351
El Poblado	134239	134918	135727	136669	136928	137309	137814	138445	139206
Guayabal	97917	98318	98795	99349	99463	99652	99917	100259	100679
Belén	203441	204209	205150	206268	206403	206717	207215	207904	208787
Palmitas	8412	8744	9093	9458	9795	10148	10517	10902	11305
San Cristobal	95160	97782	100494	103298	105684	108138	110662	113257	115926
Altavista	41183	41860	42588	43369	43855	44409	45036	45743	46535
San Antonio	139889	144601	149513	154633	159274	164099	169118	174340	179773
Santa Elena	20227	20563	20918	21293	21565	21853	22157	22478	22816
<b>Total Medellín</b>	<b>2598779</b>	<b>2616058</b>	<b>2634988</b>	<b>2655615</b>	<b>2666141</b>	<b>2678206</b>	<b>2691850</b>	<b>2707116</b>	<b>2724051</b>



## APÊNDICE 2– Projeção da população na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, discretizada por Comunas e Corregimientos

## Período 1993-2012

Comuna o Corregimiento	ÁREA (ha)	POPULAÇÃO								
	Ano	1993	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Laureles -Estadio	250,64	32626,31	39973,72	40171,42	40355,58	40526,88	40684,29	40828,84	40960,53	41083,08
La América	361,61	65296,85	74827,07	75324,31	75806,80	76271,27	76713,62	77137,13	77533,61	77906,33
San Javier	455,64	94456,41	103670,62	104680,28	105691,57	106676,93	107610,42	108517,18	109339,66	110111,09
San Cristobal	580,07	1863,82	2767,27	3475,08	4254,83	4985,90	5719,34	6434,44	6836,32	7246,77
Altavista	715,91	2476,10	5926,00	5986,86	6050,21	6113,33	6302,71	6555,20	6891,19	7228,30
<b>Total</b>	<b>2363,9</b>	<b>196719,49</b>	<b>227164,68</b>	<b>229637,96</b>	<b>232158,99</b>	<b>234574,31</b>	<b>237030,38</b>	<b>239472,80</b>	<b>241561,31</b>	<b>243575,58</b>

## Período 2013-2021

Comuna o Corregimiento	ÁREA (ha)	POPULAÇÃO								
	Ano	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Laureles -Estadio	250,64	41191,41	41289,92	41382,68	41547,54	41761,15	42024,19	42338,00	42703,61	42809,23
La América	361,61	78249,57	78571,50	78868,04	79143,28	79520,92	80003,41	80590,75	81285,41	81463,99
San Javier	455,64	110762,59	111356,56	111875,98	112452,93	113060,67	113699,21	114369,35	115071,90	115391,17
San Cristobal	580,07	7666,45	8092,55	8517,58	8728,87	8948,83	9178,12	9416,96	9665,97	9928,93
Altavista	715,91	7571,75	7913,62	8249,83	8391,01	8540,56	8698,49	8865,69	9042,39	9174,98
<b>Total</b>	<b>2363,9</b>	<b>245441,76</b>	<b>247224,15</b>	<b>248894,11</b>	<b>250263,63</b>	<b>251832,14</b>	<b>253603,42</b>	<b>255580,75</b>	<b>257769,29</b>	<b>258768,29</b>

## Período 2022-2030

Comuna o Corregimiento	ÁREA (ha)	POPULAÇÃO								
	Ano	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Laureles -Estadio	250,64	42955,82	43145,05	43377,62	43654,20	43712,09	43811,95	43954,47	44141,00	44372,56
La América	361,61	81730,22	82084,10	82528,91	83063,83	83193,26	83408,70	83710,97	84101,72	84583,39
San Javier	455,64	115738,80	116115,60	116521,57	116958,34	117056,39	117187,66	117351,34	117549,87	117781,63
San Cristobal	580,07	10200,78	10481,84	10772,56	11073,14	11328,91	11591,97	11862,53	12140,70	12426,81
Altavista	715,91	9317,74	9470,91	9635,63	9812,33	9922,29	10047,63	10189,49	10349,45	10528,64
Total	2363,9	259943,35	261297,51	262836,29	264561,83	265212,92	266047,91	267068,81	268282,75	269693,02

APÊNDICE – 3 Estimativa da população 1905-1985 da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso, aplicando uma taxa de 10%.

POPULAÇÃO DO MUNICÍPIO DE MEDELLÍN		PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO DA BACIA HIDROGRAFICA DO CÓRREGO LA HUESO	
Ano	População	Ano	População
1905	59.815	1905*	5981,5
1912	70.547	1912*	7054,7
1918	79.146	1918*	7914,6
1928	120.044	1928*	12004,4
1938	168.266	1938*	16826,6
1951	358.189	1951*	35818,9
1964	772.887	1964*	77288,7
1973	1.077.252	1973*	107725,2
1985	1.468.089	1985*	146808,9

**APÊNDICE – 4 Projeção da população 1993-2030 do Município de Medellín e da  
Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso.**

<b>PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO DE MEDELLÍN</b>			<b>PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO DA BACIA HIDROGRAFICA DO CÓRREGO LA HUESO</b>			
<b>Ano</b>	<b>População</b>	<b>Densidade Demográfica (hab/ha)</b>	<b>Ano</b>	<b>População</b>	<b>% de População na Bacia</b>	<b>Densidade Demográfica (hab/ha)</b>
1993	1.793.491	47,16	1993	196719,49	10,97	83,22
2005	2.214.494	58,22	2005	227164,68	10,26	96,10
2006	2.239.003	58,87	2006	229637,96	10,26	97,14
2007	2.265.244	59,56	2007	232158,99	10,25	98,21
2008	2.291.378	60,25	2008	234574,31	10,24	99,23
2009	2.317.336	60,93	2009	237030,38	10,23	100,27
2010	2.343.049	61,60	2010	239472,80	10,22	101,31
2011	2.368.282	62,27	2011	241561,31	10,20	102,19
2012	2.393.011	62,92	2012	243575,58	10,18	103,04
2.013	2.417.325	63,56	2.013	245441,76	10,15	103,83
2.014	2.441.123	64,18	2.014	247224,15	10,13	104,58
2.015	2.464.322	64,79	2.015	248894,11	10,10	105,29
2.016	2.481.781	65,25	2.016	250263,63	10,08	105,87
2.017	2.500.931	65,76	2.017	251832,14	10,07	106,53
2.018	2.521.818	66,31	2.018	253603,42	10,06	107,28
2.019	2.544.493	66,90	2.019	255580,75	10,04	108,12
2.020	2.569.007	67,55	2.020	257769,29	10,03	109,05
2.021	2.583.109	67,92	2.021	258768,29	10,02	109,47
2.022	2.598.779	68,33	2.022	259943,35	10,00	109,96
2.023	2.616.058	68,78	2.023	261297,51	9,99	110,54
2.024	2.634.988	69,28	2.024	262836,29	9,97	111,19
2.025	2.655.615	69,82	2.025	264561,83	9,96	111,92
2.026	2.666.141	70,10	2.026	265212,92	9,95	112,19
2.027	2.678.206	70,42	2.027	266047,91	9,93	112,55
2.028	2.691.850	70,78	2.028	267068,81	9,92	112,98
2.029	2.707.116	71,18	2.029	268282,75	9,91	113,49
2.030	2.724.051	71,62	2.030	269693,02	9,90	114,09

Os dados de população dos anos 1993 e 2005 são dados de censos oficiais, que fazem parte do período histórico; do ano 1994 até o ano 2030, os dados de população são dados projetados pelo DANE.

Nesse apêndice pode-se observar que Densidade Demográfica na Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso é maior do que a Densidade Demográfica no Município de Medellín, portanto conclui-se que o volume de detenção distribuída das águas pluviais na bacia pode ser aplicado sobre a Cidade de Medellín.

APÊNDICE – 5 Análise gráfica da projeção da população (1993-2030) do Município de Medellín e da Bacia Hidrográfica do Córrego La Hueso

